

記録ヘッド磁界計算の現状と課題

Recent Progress and Future Work in Recording Field Analysis of Recording Write Heads

金井 靖

Y. Kanai

新潟工科大学

Niigata Institute of Technology

Abstract

Numerical analysis is an indispensable tool for analyzing the recording phenomena in a very small region and in a very short period. In order to realize higher-density and higher-transfer-rate recordings, it is necessary to develop a narrow-track write head that has a large recording field, a small stray field to adjacent tracks, and a sharp response to high-frequency driving. In addition to these, remanent magnetization of the head pole tip should be avoided. However, since this kind of phenomenon cannot be expressed by Maxwell's equations, a conventional analysis method is not applicable.

This article describes recent progress in recording write head field analysis, including analysis methods, modeling, analyzed examples, and limitations. Possible directions of future work on the analysis of recording write head are also outlined.

Key words: Recording write heads, recording field analysis, finite element methods, perpendicular magnetic recording, longitudinal magnetic recording, single-pole-type head, modeling, micromagnetic analysis, magnetization process analysis.

1. はじめに

1990 年代後半から、学会、論文あるいはホームページ上で磁気記録の面密度が競われるようになり、年率 60-100 %あるいは 100 %を超える順調な伸びが報告されてきた。しかし、100 Gb/in²を超えてから面密度の伸びが鈍ってきたように思われる。すなわち、2001 年 8 月に 106.4 Gb/in² (750 kbp i x 141.9 ktp i : 面内)¹⁾が発表された後、非公式データとして垂直記録で 169 Gb/in² (850 kbp i x 199 ktp i) が実証されている²⁾ものの、面内記録では 2002 年 8 月に報告された 152.4Gb/in² (891 kbp i x 171 ktp i)³⁾、垂直記録では 2002 年 11 月に報告された 145.9 Gb/in² (772 kbp i x 189 ktp i)⁴⁾が現時点での記録とされている(ただし、これらは厳密にはデモとは言えないとの意見もある)。

Antiferromagnetically coupled (:AFC あるいは synthetic antiferromagnetic: SF) 面内媒体⁵⁾は熱磁気緩和の問題から理論的に 30-40 Gb/in²が限界とされていた記録密度を高密度側に押しやり、200 Gb/in²のポテンシャルを持つとされる。また、垂直媒体は 400 Gb/in²は可能との報告²⁾もある。一方、磁気ヘッドでは読み出しヘッドの問題の他に、記録ヘッドのトラック幅を狭くした場合には強い記録磁界を得ることが難しくなり高保磁力媒体に飽和記録することが難しくなったこと、光学的なトラック幅に対してトラック外へ磁界が漏れることから相対的に実効トラック幅が広くなる問題などがある。

一般に、信号の SN 比のために高面密度ほど媒体記録層の微粒子化を進める必要があり、この際の熱磁気緩和を防ぐために媒体の保磁力は高くなる傾向がある。従って高面密度ほど(狭いトラックほど)強いヘッド磁界が要求されると考えて良い。記録ヘッドには、

この他にヘッド磁界勾配が高いこと、記録トラック外への漏れ磁界が小さいことなどが要求される。さらに、垂直磁気記録単磁極 (single-pole-type: SPT) ヘッドと二層媒体を組み合わせた系ではスキューの問題を避け得ること、外部誘導磁界耐性があることなども重要である。

磁気記録の現象は高速で、しかもナノメートルの領域で起こるため、従来から計算機実験により現象の解明がなされてきた⁶⁾。記録ヘッドの解析シミュレーションには磁界以外の流体(浮上)解析や熱伝導解析などの重要な分野もあるが、ここでは磁界解析に焦点を絞って、解析手法、解析例および今後の課題などについて解説する。

2. 理論解析的な手法に基づくヘッド磁界の解析

数値計算手法が一般に用いられるまでは、理論解析的な手法により記録ヘッドの磁界分布を求めてきた。2次元分布を求めるには Karlqvist の式⁷⁾、トラック幅を考慮した3次元分布には Lindholm の式⁸⁾が有名である。デプスが有限である、非線形性を取り扱えない、複雑なギャップ形状に対応できない、などの制限があるものの、簡便に記録磁界分布を求めるには現在でも有用である。しかし、これらの式を使用する際には、以下の点に十分に注意することが必要である。すなわち、観測点(磁気スペーシング:ヘッド air bearing surface (ABS)から媒体厚さ中心までの距離)がギャップ長の1/2以下となると、計算精度が低下して実際には使用できない。たとえば、記録ギャップ長が100 nmのヘッドでは観測点が50 nm以下では一現在のモデルではほとんどこの制限に該当する一使用できない。さらに、deep gap fieldとして、ギャップ内の磁界強度を記録ヘッド軟磁性材料の80%程度と仮定することが多いが、実際には後述のように deep gap field は軟磁性材料の飽和磁化 M_s を超えるようである。

また、記録磁界計算ではないが、空隙のある磁気回路の空隙中および磁気コア内の磁束密度及びヘッド効率を求める手法⁹⁾は古くから用いられており、仮定磁路法として知られている。

理論解析を基礎とした手法の研究は現在でも続けられている¹⁰⁾⁻¹²⁾。数値解析手法がブラックボックスとなり易いのに対して、理論解析手法を元にした解析は直感的に磁界分布や再生出力電圧を知ることができる。また、エクセルなどの簡便なツールにより計算可能などのメリットがある。

3. マックスウェル電磁方程式の数値解法

3. 1 いろいろな数値解法

現在では形状適合性がよく、渦電流や材料非線形性も取り扱える有限要素法(finite element method: FEM)が広く用いられている。有限要素法については詳細な解説^{13), 14)}があるので本稿では割愛する。

有限要素法を用いて変位電流を無視したマックスウェルの電磁方程式を解く場合に限ってもいろいろな手法が提案されているが、ここでは不動の地位を確立した¹⁴⁾、とされる磁気ベクトルポテンシャル—電気スカラーポテンシャル法($\mathbf{A}-\phi$ 法)について述べる。

すなわち， $\mathbf{A}-\phi$ 法の支配方程式は

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_0 - \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \left\{ -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \nabla \phi \right) \right\} = 0 \quad (2)$$

となる．ただし，上式において， μ ， \mathbf{J}_0 ，および σ はそれぞれ，透磁率，強制電流密度，導電率である．

上式を用いた場合，材料の非線形性および渦電流は考慮しているが，マイクロマグネティクス，材料の強磁性共鳴，ヒステリシスおよび変位電流は考慮していない．また，磁気異方性は考慮可能であるが，複雑な形状の記録ヘッドの場所ごとに異方性を実測して入力することは事実上不可能であり，異方性を考慮した解析を行う意味は少ないように思われる．また，透磁率および導電率は周波数によらず一定であるとされる．このような条件の下であっても，構造の検討を行うには大きな問題はなく，たとえば，金属軟磁性材料ヨークにより生ずる渦電流や，二層膜垂直媒体の金属軟磁性裏打層に生ずる渦電流による応答速度の低下は十分に検討可能であろう．

なお，有限要素法以外には伝達線路行列法 (transmission line modeling method: TLM)¹⁵⁾，境界要素法 (boundary element method: BEM)^{16), 17)}，後述の有限積分法 (finite integration algorithm)，積分要素法 (integral equation method: IEM)，有限積分方程式法 (finite integral equation method: FIM)などが用いられ，時間領域差分法 (finite-difference time-domain: FD-TD)^{18), 19)}や Finite Integration Implicit Time Domain (FI²TD)法 (筆者の知る限り和訳されていない)²⁰⁾などが提案されている．

3. 2 数値解析による記録ヘッドの 2 次元，擬似 3

次元，3 次元磁界計算

1980 年代までの記録ヘッドは記録ギャップ長に比ベトラック幅が広く，Fig. 1 に示すように 2 次元解析でも十分な精度を得ることが可能であった²¹⁾．さらに，計算機の手数，主記憶容量の制限から 3 次元解析の例²²⁾は極めて少ない．

面記録密度が向上すると同時に転送速度が上がるにつれて，書き込み周波数が高くなる．それに伴って，90 年代後半から渦電流による応答速度の低下 (記録電流に対して記録磁界が追従しない現象) が顕在化してきた．

田河らは擬似 3 次元モデルを用いて，高い書き込み周波数への対応法を述べている²³⁾．記録磁界解析の面からは，3 次元解析では精度が不十分のため擬似 2 次元解析を用いたとしており，3 次元渦電流解析が一般的になったのはこの後であると言えよう．A. Torabi らも同じ頃，2 次元平面で薄膜ヘッドの渦電流解析を行っている²⁴⁾ことは興味深い．

このような中で，3 次元モデルを用いて高周波記録電流に対して記録磁界や渦電流分布を求めるベンチマーク問題を解くことになった．解析したモデルは情報ストレージ研究推進機構 (Storage Research Consortium: SRC) により提案された 2 Gb/in² 用の記録ヘッ

ドであり、寸法とヨーク材料の B-H 特性は Fig. 2 に示す通りである。得られた記録磁界の応答を Fig. 3 に示す²⁵⁾が、図中の記号 no.2 は Ikeda, nos. 3.1 および 3.2 は Kameari による結果であることを示す。なお、同図には示していないが、5つのグループにより得られた解は全て前述の A- ϕ 有限要素法によるものである。すなわち、有限要素法により正しくモデリングを行えば正確な解が得られることが確認された。さらに、後述の電子線トモグラフィ法によっても解の検証がなされた。薄膜ヘッドで渦電流の影響がさほどまでに大きいとは思わなかった、というのが筆者の偽らざる感想である。磁気記録ライトヘッドの 3 次元モデルを用いた渦電流解析が一般的になったのはこの頃からと思われる。

3. 3 面内記録ヘッドの解析

面内記録ヘッドは、高面記録密度化や転送レートの高速化（記録周波数の高周波化）とともに、Fig. 4 のようにヨーク長が短くなった²⁶⁾。最近の報告では、大幅に薄膜製造プロセスを変更することなしに、ギャップ深さ（スロートハイト）とトラック幅を正確に製造可能で、さらには強い記録磁界を発生するために、Fig. 5 に示すスティッチトポール型²⁷⁾の発展形²⁸⁾と Fig. 6 のフラットトップポール型^{29), 30)}が提案されており、ヨーク長も 10 μ m 程度まで短縮されている。しかし、軟磁性材料の飽和磁化の限界に近い材料^{31)–36)}をポール先端に配しても、最大記録磁界は狭トラック化とともに急激に減少する³⁷⁾ことから、高保磁力媒体への記録は非常に困難となっている。これは、“高面密度ほど強いヘッド磁界が要求される”ことから記録ヘッド最大の問題と言っても過言ではない。

このように、従来からの構造の薄膜記録ヘッドを用いている限り、これまでの面内記録ヘッドに比べて飛躍的に強い記録磁界を得ることは極めて困難である。製造プロセスが大きく変わるという欠点はあるが、大きな記録磁界強度を得る、という面から平面ヘッドは極めて有望である。平面ヘッドの考え方は新しいものではなく、これまでもいろいろな提案がなされている^{38)–40)}。我々は SRC によって提案された Fig. 7(a),(b)に示す平面記録ヘッドモデルをもとに、高い記録磁界強度とトラック外への漏れ磁界を抑える構造を検討した⁴¹⁾。最終的に得られた構造は Fig. 8(a),(b)に示すとおり、主ヨークに補助ヨークを配し、D = 100 nm, R = 200 nm, Dh = 400 nm とした構造である。Fig. 9(a), (b), (c)に示すように、補助ヨークがない構造では高い記録磁界は得られるもののトラック外への漏れ磁界を抑えることが極めて困難⁴²⁾である。なお、隣接トラックへの漏れ磁界の割合 α (side writing ratio)を

$$\frac{\text{field strength at adjacent track center}}{\text{field strength at the track center}} \quad (3)$$

と仮定している。記録ヘッドの磁界解析という立場からは、Fig. 10 に示すように、ヨーク内の磁束密度およびギャップ中の磁界強度が軟磁性材料の飽和磁化 ($M_s = 20$ kG)をはるかに超えることが興味深い。

3. 4 SPT ヘッドの解析

3. 4. 1 モデリング

垂直磁気記録方式は面内記録に比べて理論的に高密度化の点で優位性があることが指摘されてきたが、52.5 Gb/in²なる面密度の実証実験⁴³⁾を契機に、数値解析を含めた報告例が急増している。

筆者らの報告⁴⁴⁾まで、二層媒体を含めた SPT ヘッド⁴⁵⁾の数値解析モデリングに関する詳細な報告例はなかった。媒体の大きさは解の精度と計算時間に大きく影響を与えるため、事前の検討が必須であった。Fig. 11 に検討した SPT ヘッドの有限要素メッシュ (1/2 領域) を示すが、同図において媒体の大きさ ($L_I \times W_I$) を Table 1 のように変えて解析計算を行い、次のような結果を得た。すなわち、Fig. 12(a), (b)に示すように、air bearing surface (ABS)に露出する主磁極、リターンパスを覆う程度に二層媒体をモデル化すれば、静磁界解析および渦電流解析で十分な精度が得られることが分かった。これ以上の面積をモデル化した二層媒体を用いても、計算時間が急増する一方で高い精度は得られなかった。また、媒体の磁化過程を考慮しない場合であっても計算時間が膨大になることから、我々は媒体記録層を透磁率 2 の線形磁性体として扱っている。Senanan ら⁴⁶⁾は中村らの 2 次元有限要素法によるヘッドー媒体相互作用⁴⁷⁾を 3 次元マイクロマグネティクス計算により検証し、有限要素計算で媒体に線形透磁率を与える場合には 1.66 程度が妥当であるとしている。これに対して、面内記録では記録層に与える透磁率によって得られる記録磁界強度が大きく変わることはない⁴⁸⁾。これらのモデリングを経て、それまで問題視されていた 2 層媒体に流れる渦電流によっては追従性が劣化しないことが明らかとなった。さらに、Fig. 13 から分かるように、スロートハイト長が短いほど強い記録磁界が得られ、記録磁界強度が軟磁性材料の飽和磁化 M_s を超えることが分かった。これは、強磁界電磁石設計時に議論されている⁴⁹⁾のと同様に、アペックス部のチャージの寄与と考えられる。記録磁界が軟磁性材料の飽和磁化 M_s を超えることは、別の構造と別の解析ソフトウェアを用いた Takahashi らによっても示された⁵⁰⁾。

3. 4. 2 垂直磁気記録ヘッドに特有な現象の解析

SPT ヘッドと二層媒体を用いた系では光学的な記録ポール幅に比べて実際の磁気トラック幅が大きいことが指摘されている。たとえば、100 Gb/in²クラスのデモ⁵¹⁾では光学記録ポール幅 105 nm に対して磁気トラック幅が 180 nm であり、同社の面内記録 101.3 Gb/in²(680 kbp i x 149 ktp i)デモ⁵²⁾ (光学記録ポール幅：127 nm, トラックピッチ 169 nm: 149 ktp i) と比べると、磁気トラック幅が光学記録ポール幅に比べて大きいことが分かる。そのため、サイドライティングを抑える構造が必要であろう、としている。Mallary らは 80 年代にサイドライティングを抑える構造を提案している⁵³⁾。

Ise ら⁵⁴⁾は外部磁界耐性に優れ、低起磁力で高磁界を発生し、リターンパス部分にネガティブシュートが少ない優れた Cusp Field SPT (CF-SPT) ヘッドを開発している。

Ito ら⁵⁵⁾は強い記録磁界を得る手段、スキュー問題を避ける手段、外部磁界耐性を強める手段などが数値解析され、実験結果とともに示されている。また、数値解析の部分を詳述した論文⁵⁶⁾も興味深

い。テーパポールによれば、記録パルス幅を狭めると同時に、記録磁界のピークを強くすることができていることが示されている。外部磁界耐性に焦点を当てた有限要素解析が Shukh⁵⁷⁾によってもなされている。

大きな記録磁界勾配によって磁化遷移幅を狭くでき、高密度記録、高 SN を達成できることは以前より広く知られており、垂直 SPT ヘッドでも磁界勾配を大きくするための手法が検討されている。Xia⁵⁸⁾は 2 次元有限要素解析に媒体磁化過程を組み合わせた解析、Ise⁵⁹⁾は 3 次元有限要素法による解析を行っている。また、Shukh⁶⁰⁾は 3 次元有限要素法とマイクロマグネティクス解析の組み合わせによっているが、いずれも主磁極とトレーリング側のリターンパスを近付けることによって高い記録磁界勾配が得られている。

磁界解析を多く紹介したという面から ReadRite 社の一連の垂直 SPT ヘッドに関する論文は興味深い⁶¹⁾⁻⁶³⁾。非線形静磁界解析を用いて、記録媒体の保磁力に対して記録磁界勾配が最大となるような設計法を示している。

3. 4. 3 1 Tb/in² を仮定した記録ヘッドの計算

1 Tb/in² なる面密度に向けた基本的な検討がなされており⁶⁴⁾⁻⁶⁶⁾ これらの予測によれば、面内記録から垂直磁気記録方式に置き換わるのは数 100 Gb/in² 付近であり、1 Tb/in² の実現には垂直磁気記録方式が不可欠であるとされている。ところが、1 Tb/in² の報告が最初になされて⁶⁴⁾以来、例えば記録ヘッドでは、トラック幅を 38 nm としたときに、どれくらいの記録磁界が得られるか、という報告はほとんどない。むしろ、後述のように、マイクロマグネティクス解析では記録ヘッドは極めて単純化されるか、「これくらいの磁界が得られるはずだ」として議論が進められる。我々は、実際に 1 Tb/in² を仮定した場合に、記録ヘッドが発生する磁界分布はどれくらいか、を有限要素法により検討した⁶⁷⁾。Fig. 14-16 および Table 2 に検討したヘッドの諸元を示す。なお、同表の下線で示した数値は文献⁶⁴⁾で示されたものであり、その他の数値は我々が仮定したものである。いろいろなヘッド構造に対して得られた結果を Table 3 に示すが、サイドシールド、テーパ構造の主磁極およびテーパ構造のリターンパスを有する構造 (model 8) によれば、トラック幅 38 nm で強い記録磁界、急峻な記録磁界勾配が得られ、トラック外への漏れ磁界を抑えることができ、かつスキューの問題が起こり難い記録磁界分布を得ることが可能である。さらに、2 GHz の高周波電流を加えたとしても、渦電流による影響は軽微であることも明らかとなった (ただし、強磁性共鳴やマイクロマグネティクスは考慮していないことに注意されたい)。

3. 5 記録ヘッドのマイクロマグネティクス解析

最近のトラック幅や寸法を考慮すると、もはやマクスウェル方程式で現象を表現することは限界である。特に磁化分布をマクスウェル方程式で表現することは不可能であり、マイクロマグネティクス解析が必要になる。現在、最も広く用いられるマイクロマグネ

ティクス解析は Landau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式を差分法で離散化する手法⁶⁸⁾である。

垂直二層媒体と SPT ヘッドの組み合わせでは、ヘッドポール先端の残留磁化により記録された信号を消去することが大きな問題である。中本らは SPT ヘッドのポール先端の残留磁化について LLG 解析を行い、トラック幅とスロートハイトの比に対して残留磁化の影響を述べている⁶⁹⁾⁻⁷¹⁾。

さらに、ヘッド全体を LLG 解析した例もある。非常に小さな記録ヘッド (640 nm x 640 nm : 主磁極 ABS 面積 80 nm x 80 nm) を仮定して、SPT ヘッドの主磁極ヨーク部分からポール先端を 10 nm 切り離し、さらに厚さ方向も 2 層に切り離すと磁化分布が理想的になり、データレート 1 Gbps にも十分対応可能であることを述べている⁷²⁾。なお、媒体記録層および裏打層の記述はない。

3. 6 媒体磁化過程を考慮した解析

記録ヘッドの磁界解析とはいえ、記録媒体を無視した解析では、スピンスランドによる実測結果との比較を行う上で大きな制約を受ける。中村らは早くから磁気記録シミュレータの開発に着手し、2次元シミュレータ⁷³⁾および3次元シミュレータ⁷⁴⁾を発表している。最近では、品川ら^{75), 76)}による有限要素法を用いたヘッドと媒体全体を解析する手法が報告されている。Fig. 17 は解析の手順をフローチャートで表したものである。解くべき方程式は

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}_o + \nu_o \text{rot} \mathbf{M} \quad (4)$$

であって、軟磁性材料の非線形性および媒体を Stoner-Wohlfarth モデルにより考慮している。計算時間がかかるなどの問題があるものの、ヘッド全体および媒体を考慮し、再生出力まで求め得る手法として期待される。

宮下ら⁷⁷⁾は Fig. 18 のモデルを用いて、3次元空間でマックスウェル方程式を解いて記録磁界を求め、得られた磁界分布を媒体磁化過程のマイクロマグネティクス解析に用いている。Batra ら⁷⁸⁾も同様な手順を用いている。

マイクロマグネティクス解析では、計算機パワーの面から、記録ヘッドが極めて単純化される。Gao ら⁷⁹⁾は SPT ヘッドの先端部分と媒体を Fig. 19 のようにモデル化してマイクロマグネティクス解析を行っており、斜め記録に言及した興味深い論文である。また Victora ら⁸⁰⁾も同様な手法を用いているが、実際には励磁コイルの位置など、ヘッド先端だけでは記録ヘッドを表現できないことは明らかである。吉田ら^{81), 82)}は垂直磁気記録媒体のビットシフト特性に及ぼす下地膜の影響を調べるために、SPT ヘッドを棒磁石モデルで表現しハイブリッド (continuous-granular-continuous: CGC) 媒体のマイクロマグネティクス解析を行っている。また、Goodman ら⁸³⁾は理想化した SPT ヘッド磁界を加えて CGC 媒体のマイクロマグネティクス解析を行っている。

これらから分かるように、現在の計算技術と計算機パワーでは、記録ヘッド全体と媒体を LLG 方程式で表現して差分法で解析するのは極めて困難である。さらに、現在の計算機パワーでは止むを得

ないこととはいえ、媒体の磁化過程を考慮した解析では記録ヘッドは単なる脇役として表現されることが多い。

4. 計算結果と計測結果の直接比較

数値解析を行って、その精度検証のためには、ヘッドから発生する磁界分布を直接計測することが重要である。媒体を介した計測では、ヘッドの磁界分布そのものを知ることは極めて難しい。

これまでも電子線トモグラフィ法を用いて媒体を介することなく、記録ヘッドの記録磁界を空間分解能 100 nm で直接計測することが可能であった⁸⁴⁾。しかし、ABS から計測面の距離は 300 nm と大きく、実際の磁気スペーシングとは隔たりがあった。

これに対して、Fig. 20 に示す投射電子線磁界トモグラフィ装置 (Projection Electron-beam Magnetic Tomography: PEMT) によれば、空間分解能 (最高) 10 nm, ABS からの距離 30 nm で計測可能である⁸⁵⁾。さらに最新の報告例⁸⁶⁾では空間分解能 30 nm, ABS からの距離 10 nm の結果を示しており、実際の磁気スペーシングでの計測が達成されたことからますます期待される。また、MFM をベースにした高周波における記録磁界計測法も注目される⁸⁷⁾。

5. 市販ソフトウェア

Table 4 にマックスウェルの電磁方程式を解くための代表的な市販ソフトウェアを示すが、汎用性を持たせるため多くが有限要素法を用いている。これらの磁界解析ソフトウェアの多くは 3 次元空間で渦電流 (過渡解析)、材料非線形性、異方性、ヒステリシス、などを扱えると明記してある。ただし、実際に媒体の磁化過程を求め得るソフトウェアがあるかどうかは疑問が残る。また、数値解析を行っていることを意識させるものと、ブラックボックスを目指しているものがあるが、どちらが良いとは一概に言えず、使用者の好みとなろう。

最近、市販ソフトウェアを使用して感じた問題が 2 点ある。まず、出力ファイルが 2 GB を超えるとウィンドウズでは読み出せない。そのため、自作プログラムにより出力ファイルを分割することが必要であった。2 点目はコンパイラや OS の制限によって、主記憶空間が 1 GB を超えると計算そのものが不可能となったことであるが、要素数の少ないモデルを作成し直して対処した。

6. 今後の課題

今後の高密度化を考えると、ナノスケールの磁化を考慮する必要がある。マックスウェル方程式を解くだけでは明らかに限界があり、マイクロマグネティクスの考慮が必須である。その場合、計算機の数値や主記憶容量が現状のペースで発展したとしても、ヘッド全体をモデル化し媒体磁化過程と再生過程を解析できるのは、かなり先のことになるように思われる。さらに、たとえば 1 Tb/in² の記録ヘッドのディメンジョンを考えると、現状の差分格子はかなり粗い (典型的な例としては 10 nm x 10 nm x 10 nm) と言わざると得ない。

しかし、差分格子を $2\text{ nm} \times 2\text{ nm} \times 2\text{ nm}$ にすると計算量が 2 桁以上も増えることから、近未来の計算機的能力では現実的ではない。このような観点からは差分法の他に、格子（要素）の大きさを自由にえ得る LLG 方程式を有限要素法で離散化した手法⁸⁸⁾が発展することを期待したい。

実用的には、CAD データから直接モデリングしたり、アイデアをすばやくモデル化するプリプロセッサ^{89), 90)}が特に重要であろうし、結果を自由に高速に可視化するポストプロセッサも必須である。さらには、形状や材料を最適化する手法⁹¹⁾にも期待したい。

7. おわりに

いろいろな手法やモデルを用いて記録ヘッドが解析され、現象解明や製品開発がなされていることを述べた。今後の磁気記録の高密度化・高速化を進めるためには、マイクロマグネティクス解析を中心とした数値解析技術の発展が欠かせないように思われる。一方、3 次元解析が現実的ではなかった 1980 年代以前から、系を単純化するモデリング技術は依然として重要である。

なお、数値解析とは切り離して考えられない計算機については触れなかった。その理由は、筆者が最近の数年間はパーソナルコンピュータ以外の計算機を使う機会がなかったためである。

謝 辞

垂直記録 SPT ヘッド解析においてご助言をいただいている東北大学電気通信研究所中村慶久教授および村岡裕明教授に深謝する。また、CF-SPT ヘッドについては秋田県高度技術研究所（A I T）の山川清志博士および伊勢和幸氏にご指導いただいている。3. 2 節で述べたベンチマーク問題および 3. 3 節で述べた平面型ライトヘッドの解析においては SRC シミュレーションワーキンググループの協力を得た。特に、富士通研究所の押木満雅氏、日立製作所の鈴木良夫氏およびソニーの宮内貞一氏の支援を受けた。また、3.3, 3.4.1, および 3.4.3 で示した解析結果は全て市販電磁界解析ソフトウェア JMAG-Works/Studio（日本総合研究所製）を用いて求めた。ここに記して感謝する。

文 献

- 1) J. Hong, J. Kane, J. Hashimoto, M. Yamagishi, K. Noma, and H. Kanai: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 15 (2002).
- 2) 大月章弘: International Disk Forum, トラック 2, Session 2 (2003).
- 3) N.-H. Yeh, *The Magnetic Recording Conf. (TMRC)*, B2 (2002).
- 4) <http://www.readrite.com/html/whatnew/topgun.html>, Nov. 15, 2002.
- 5) E. N. Aberra, M. Suzuki, and I. Okamoto: *Intermag Conf.*, AA-01 (2000).
- 6) 中村慶久, 田河育也, 清水幸也: 信学論, **J-79-C-I**, 152 (1996).
- 7) O. Karlqvist: *Trans. R. Inst. Technol.*, **86** (1954).
- 8) Dennis A. Lindholm: *IEEE Trans. Magn.*, **13** (1977).

- 9) 松本光功, 伊藤彰義, 森迫昭光: 磁気記録工学 (共立出版, 1990) p. 18-19.
- 10) H. Muraoka, Y. Sugita, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2235 (1999).
- 11) 鈴木良夫: 第 26 回日本応用磁気学会学術講演会, 20aB-4 (2002).
- 12) H. A. Shute, J. J. Miles, D. T. Wilton, and D. J. Mapps: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2207 (2002).
- 13) 藤原耕二: 電磁界解析の実際, 応用磁気セミナー, 25 (1997).
- 14) 藤原耕二: 日本応用磁気学会誌, **25**, 133 (2001).
- 15) Robert E. Jones, Jr.: *IEEE Trans. Magn.*, **14**, 509 (1978).
- 16) R. Rockelein and H. Schewe: *Siemens Res. Dev. Rep.*, **16**, 248 (1987).
- 17) D. Litvinov, J. Wolfson, J. A. Bain, R. W. Gustafson, M. H. Kryder, and S. Khizroev: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2253 (2002).
- 18) 田邊信二: 日本応用磁気学会誌, **23**, 1879 (1999).
- 19) Shinji Tanabe: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **235**, 388 (2001).
- 20) M. Clemens, S. Drobny, and T. Weiland: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 601 (2002).
- 21) M. Iizuka, Y. Kanai, T. Abe, M. Sengoku, and K. Mukasa: *IEEE Trans. Magn.*, **24**, 2623 (1988).
- 22) J. Kishigami, K. Itoh, and Y. Koshimoto: *IEEE Trans. Magn.*, **24**, 2841 (1988).
- 23) 田河育也, 上原裕二: 日本応用磁気学会誌, **22**, 199 (1998).
- 24) A. F. Trabi, M. L. Mallary, R. Perry, and G. Kimball: *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 1465 (1998).
- 25) K. Fujiwara, F. Ikeda, A. Kameari, Y. Kanai, K. Nakamura, N. Takahashi, K. Tani, and T. Yamada: *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 1784 (2000).
- 26) 松崎幹男: 日本応用磁気学会第 124 回研究会資料, 9 (2002).
- 27) M. Yoshida, K. Terunuma, A. Iijima, and Y. Sasaki: *IEEE Trans. Magn.*, **35**, 2496 (1999).
- 28) 芳田伸雄, 大嶽一郎, 工藤一恵, 府山盛明, 谷山彰, 大友茂一, 丸山洋治: 第 26 回日本応用磁気学会学術講演会, 19aB-6 (2002).
- 29) 池田正二, 田河育也, 上原裕二, 大塚善徳, 前多宏志, 関川岳, 長谷川実: 第 26 回日本応用磁気学会学術講演会, 19aB-5 (2002).
- 30) S. Ikeda, I. Tagawa, Y. Uehara, Y. Ohtsuka, H. Maeda, T. Sekikawa, M. Kakehi, and M. Hasegawa: *Trans. Magn. Soc. Japan*, **3**, 22 (2003).
- 31) K. Stoev, F. Liu, Y. Chen, X. Dang, P. Luo, J. Chen, J. Wang, K. Kung, M. Lederman, M. Re, G. Choe, J. N. Zhou, and M. Yu: *Journal of Applied Physics*, **93**, 6552 (2003).
- 32) S. W. Yuan, E. Lee, W. Hsiao, H. Santini, H. Lam, G. Sui, T. Lam, Y. Luo, M. Madison, V. Nikitin, B. Webb, Y. Shen, M. Ramasubramanian, J. Jarratt, R. Hsiao, T. Harris, S. Sahami, N. Robertson, D. Freitas, Y. Hsu, M. Williams, A. Taratorin, J. Heidmann, R. Simmons, and J. Smyth: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 1873 (2002).
- 33) 今井健太, 横島時彦, 志賀大三, 高島京子, 逢坂哲彌: 第 26 回日本応用磁気学会学術講演会, 19aB-3 (2002).

- 34) S. Ikeda, I. Tagawa, T. Kubomiya, J. Kane, Y. Uehara, and T. Koshikawa: *Trans. Magn. Soc. Japan*, **3**, 17 (2003).
- 35) H. Katada, T. Shimatsu, I. Watanabe, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2225 (2002).
- 36) N. X. Sun and S. X. Wang: *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 2506 (2000).
- 37) 金井 靖 : 信学論 C, **J83-C**, 774 (2000).
- 38) A. Matsuzono and T. Miyauchi, "Thin film magnetic head," *US Patent*, # 5,274,520, Dec. 28, 1993.
- 39) Jean-Pierre Lazzari: *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 80 (1996).
- 40) Y. Yoshida, K. Araki, S. Sugano, and Y. Kaneta: *IEEE Trans. Magn.*, **34**, 1507 (1998).
- 41) Y. Kanai, R. Matsubara, K. Fujiwara, and N. Takahashi: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2210 (2002).
- 42) K. S. Kim, C. E. Lee, and H. Lim: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2213 (2002).
- 43) 松原 亮, 金井 靖, 村岡裕明, 中村慶久: 日本応用磁気学会誌, **25**, 531 (2001)
- 44) H. Takano, Y. Nishida, M. Futamoto, H. Aoi and Y. Nakamura: *IEEE International Magnetism Conf.*, AD-06, (2000).
- 45) H. Muraoka, K. Sato, Y. Nakamura, T. Katakura, and K. Yazawa: *IEEE Trans. Magn.* **34**, 1474 (1998).
- 46) K. Senanan and R. H. Victora: *47th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials*, FA-06 (2002) (not published).
- 47) Y. Nakamura and I. Tagawa: *IEEE Trans. Magn.*, **24**, 2329 (1988).
- 48) Y. Zhou, J. Giusti, and J. Fernandez-de-Castro: *Journal of Applied Physics*, **93**, 7014 (2003).
- 49) 近角總信 : 強磁性体の物理 (裳華房, 1985) 39.
- 50) S. Takahashi, K. Yamakawa, and K. Ouchi: *Journal of Applied Physics*, **93**, 6546 (2003).
- 51) W. R. Eppler, A. Sunder, D. W. Karns, E. M. Kurtas, G. A. Ju, X. Wu, P. A. A. van der Heijden, Y. Kubota, H. Zhou, and C.-H. Chang: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 663 (2003).
- 52) Z. Zhang, Y. C. Feng, T. Clinton, G. Badran, N.-H. Yeh, G. Tarnopolsky, E. Girt, M. Munteanu, S. Harkness, H. Richter, T. Nolan, R. Ranjan, S. Hwang, G. Rauch, M. Ghaly, D. Larson, E. Singleton, V. Vas'ko, J. Ho, F. Stageberg, V. Kong, K. Duxstad, and S. Slade, *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 1861 (2002).
- 53) M. L. Mallory, "Vertical Magnetic Recording Arrangement," *US Patent*, #4 656 546, April 7, 1987. M. L. Mallory and S. C. Das, *Reissued* #33 949, June 2, '92.
- 54) K. Ise, K. Yamakawa, K. Ouchi, H. Muraoka, Y. Sugita, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 2520 (2000).
- 55) K. Ito, Y. Kawato, R. Arai, T. Okada, M. Fuyama, Y. Hamakawa, M. Mochizuki, Y. Nishida, T. Ichihara, and H. Takano: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 175 (2002).
- 56) M. Mochizuki, Y. Nishida, Y. Kawato, T. Okada, T. Kawabe, H. Takano: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **235**, 191 (2001).

- 57) A. Shukh: *Journal of Applied Physics*, **93**, 7750 (2003).
- 58) W. Xia, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2216 (2002).
- 59) K. Ise, K. Yamakawa, N. Honda, K. Ouchi, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *INTERMAG EUROPE*, FB-03, (2002).
- 60) A. Shukh and J. van Ek: *Journal of Applied Physics*, **93**, 7837 (2003).
- 61) F. Liu, K. Stoev, Y. Chen, X. Dang, J. Wang, H. Jiang, Y. Liu, P. Luo, L.-C. Wang, R. Esch, J. Chen, S. F. Gu, C. Liu, K. T. Kung, M. Lederman, and M. Re: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 1647 (2002).
- 62) J. Y. Wang, A. Prbhakar, and F. Liu: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2072 (2002).
- 63) K. Stoev, F. Liu, Y. Chen, X. Dang, J. Wang, H. Jiang, Y. Liu, P. Luo, L.-C. Wang, R. Esch, J. Chen, S. F. Gu, C. Liu, K. T. Kung, M. Lederman, and M. Re: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2243 (2002).
- 64) R. Wood: *IEEE Trans. Magn.*, **36**, 36 (2000).
- 65) M. Mallery, A. Torabi, and M. Benakli: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 1719 (2002).
- 66) R. H. Victora, K. Senanan, and J. Xue: *INTERMAG EUROPE*, GA-01 (2002).
- 67) Y. Kanai, R. Matsubara, H. Watanabe, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, (2003) (in press).
- 68) Y. Nakatani, Y. Uesaka, and N. Hayashi: *Japan. J. Applied Physics*, **28**, 2485 (1989).
- 69) 中本一広, 川戸良昭, 芳田伸雄, 岡田泰行, 幡谷昌彦, 望月正文, 渡辺克朗, 府山盛明: 日本応用磁気学会誌, **27**, 124 (2003).
- 70) M. Mochizuki, C. Ishikawa, H. Ide, K. Nakamoto, Y. Nakatani, and N. Hayashi: *Journal of Applied Physics*, **93**, 6748 (2003).
- 71) K. Nakamoto, T. Okada, K. Watanabe, and H. Hoshiya: International Disk Forum, トラック 2, Session 7 (2003).
- 72) D. Z. Bai and J.-G. Zhu: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2240 (2002).
- 73) Y. Nakamura and I. Tagawa: *IEEE Trans. Magn.*, **25**, 4159 (1989).
- 74) Y. Shimizu, I. Tagawa, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **31**, 3096 (1995).
- 75) 藤原直哉, 品川公成, 足穂孝平, 藤原耕二, 高橋則雄: 第 26 回日本応用磁気学会学術講演会, 20aB-5 (2002).
- 76) 藤原直哉, 品川公成, 足穂孝平, 藤原耕二, 高橋則雄: 信学技報, MR2002-36 (2002).
- 77) 宮下英一: 日本応用磁気学会誌, **25**, 126 (2001).
- 78) S. Batra, M. Covington, T. M. Crawford, B. Crue, P. A. A. van der Heijden, J. Jayashankar, E. C. Johns, M. Kryder, K. Minor, R. Rottmayer, U. Tran, and J. West: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 157 (2002).
- 79) K.-Z. Gao and H. N. Bertram: *IEEE Trans. Magn.*, **39**, 704 (2003).
- 80) M. S. Patwari, S. Batra, and R. H. Victora: *Journal of Applied Physics*, **93**, 6543 (2003).
- 81) 吉田和悦, 斎藤夏樹: 第 26 回日本応用磁気学会学術講演会, 17pPS-5, (2002).
- 82) 吉田和悦: 信学技報, MR2002-34 (2002).

- 83) A. M. Goodman, S. J. Greaves, Y. Sonobe, H. Muraoka, and Y. Nakamura: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 2051 (2002).
- 84) H. Shinada, H. Suzuki, S. Sasaki, H. Todokoro, H. Takano, and K. Shiiki: *IEEE Trans. Magn.*, **28**, 3117 (1992).
- 85) 島倉智一, 中村公夫, 伊藤健一, 丸山洋治, 鈴木寛: 日本応用磁気学会誌, **27**, 245 (2003).
- 86) 中村公夫, 島倉智一, 鈴木寛: International Disk Forum, トラック 2, Session 3 (2003).
- 87) M. Abe and Y. Tanaka: *IEEE Trans. Magn.*, **38**, 45 (2002).
- 88) I. Saito, *IEEE Trans. Magn.*, **32**, 1106 (1996).
- 89) 谷口健男: FEM のための要素自動分割—デローニ三角分割法の利用 (森北出版社, 1992).
- 90) D. N. Shenton and Z. J. Cendes: *IEEE Trans. Magn.*, **21**, 2535 (1985).
- 91) 高橋則雄: 磁界系有限要素法を用いた最適化 (森北出版, 2001).

Figure Captions

Fig. 1 Comparison of calculated and measured Metal-In-Gap head fields²¹⁾. The FEM calculation was done in two dimensions and the measurement used was electron beam tomography method.

Fig. 2 Dimensions of 2 Gb/in² write head and B-H curve used for benchmark ²⁵⁾.

Fig. 3 Applied current and calculated longitudinal component of recording fields obtained by several research groups²⁵⁾.

Fig. 4 Size reduction and progress of write head dimensions ²⁶⁾.

Fig. 5 Cross-section of new stitched-pole write head ²⁸⁾. The yoke length is approximately 10 μm .

Fig. 6 Cross-section of Flat-top-type writer ³⁰⁾.

Fig. 7 Schematic structure of original planar-type write head (a) top view and (b) side view ⁴¹⁾.

Fig. 8 Schematic structure of optimized planar-type write head (a) bird's eye view and (b) enlarged gap region ⁴¹⁾. The optimized dimensions were $D = 100 \text{ nm}$, $R = 200 \text{ nm}$, $D_h = 400 \text{ nm}$.

Fig. 9 DC recording field distributions of (a) original and (b) optimized planar type write head, and (c) comparison of side-writing ratio for various write heads ⁴¹⁾.

Fig. 10 The magnetic flux distribution of planar type recording field. The maximum flux density in the yoke was 30 kG and the deep gap field was beyond yoke material M_s in order to satisfy the continuity of normal component of magnetic flux density B_n .

Fig. 11 Finite-element mesh. The calculations were performed varying the medium area ($L_I \times W_I$).

Fig. 12 Comparison of (a) DC and (b) transient recording fields for various medium area ⁴⁴⁾.

Fig. 13 DC recording field vs. throat height of main pole. The DC recording field is beyond M_s of yoke material (18 kG).

Fig. 14 CF-SPT write head model for 1 Tbit/in². The side shields are not shown.

Fig. 15 Schematic structure of side shields.

Fig. 16 Schematic structure of tapered main pole and tapered return yoke. The calculations were done for $D1 = 25$ nm and $D2 = 0$.

Fig. 17 Flow diagram of obtaining the recording process ⁷⁶⁾.

Fig. 18 Modeling of the recording write head. The obtained field will be used for LLG calculations ⁷⁷⁾.

Fig. 19 SPT write head and medium model for 1 Tbit/in² tilted and conventional perpendicular recordings ⁷⁹⁾.

Fig. 20 The principle of projection electron-beam magnetic tomography ⁸⁵⁾.

Tables

Table 1 Various models used for calculations.

Table 2 Major specifications of the cusp field SPT head for 1 Tbit/in².
The assumed saturation flux density and initial permeability for soft magnetic materials are 24 kG and 1000, respectively.

Table 3 Calculated dc recording field strength, recording field gradient, and side-writing ratio for various structures.

Table 4 Electromagnetic field simulators available on the market.

金井 靖（かない やすし）

昭 5 9 新潟大・院・了，**同年** アル
プス電気（株）入社．**平 4** 新潟大・
工・助教授，**平 7** 新潟工科大・助教
授を経て，**平 1 1** 同教授，現在に至
る．この間，**昭 6 1** アルプス電気
（株）在職のまま新潟大・院・博士課
程に在籍．**平元** 同了．**平 1 4** Florida
International Univ. 客員研究員．

専門 磁気記録，数値電磁界解析

（工博）

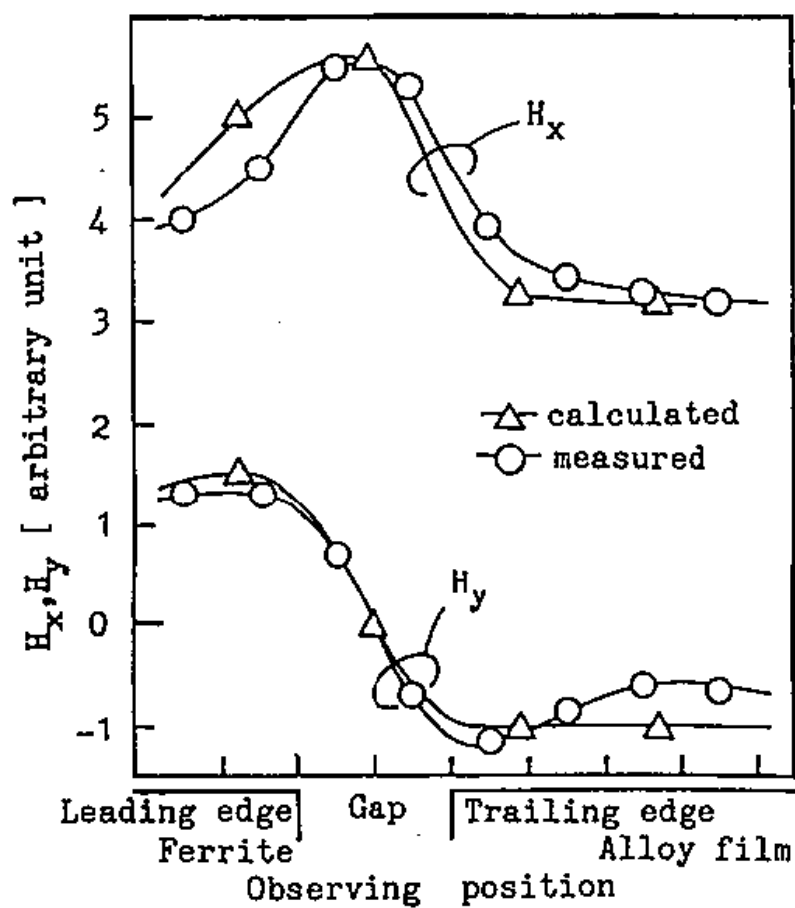


Fig. 1

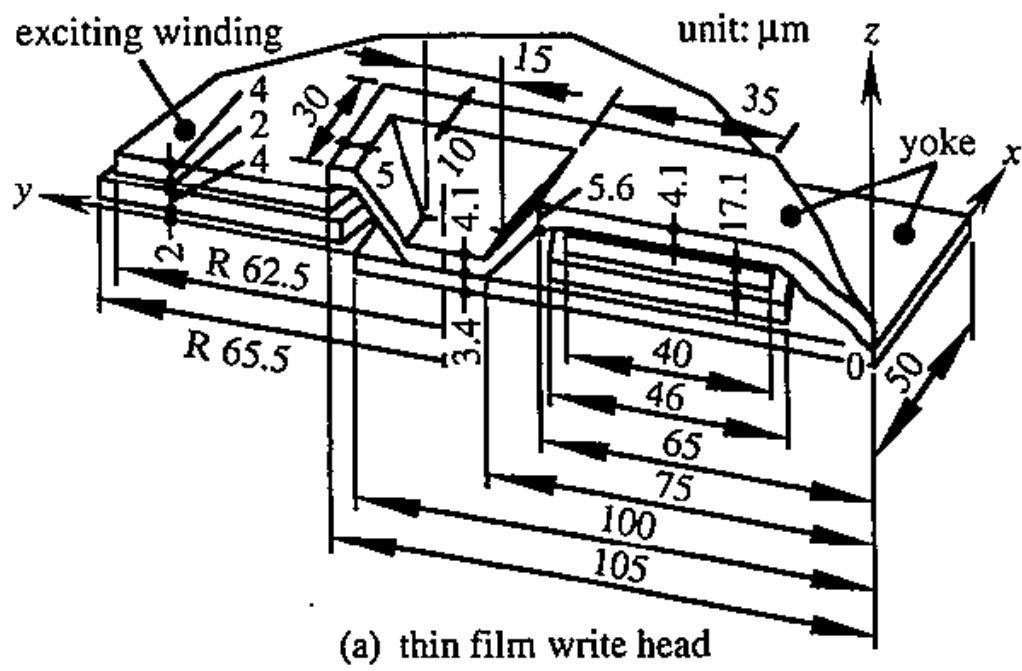
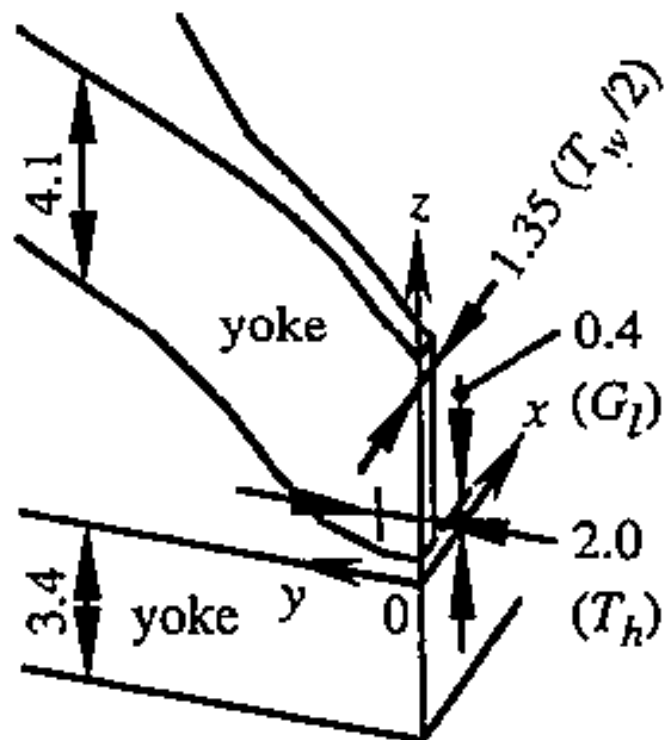
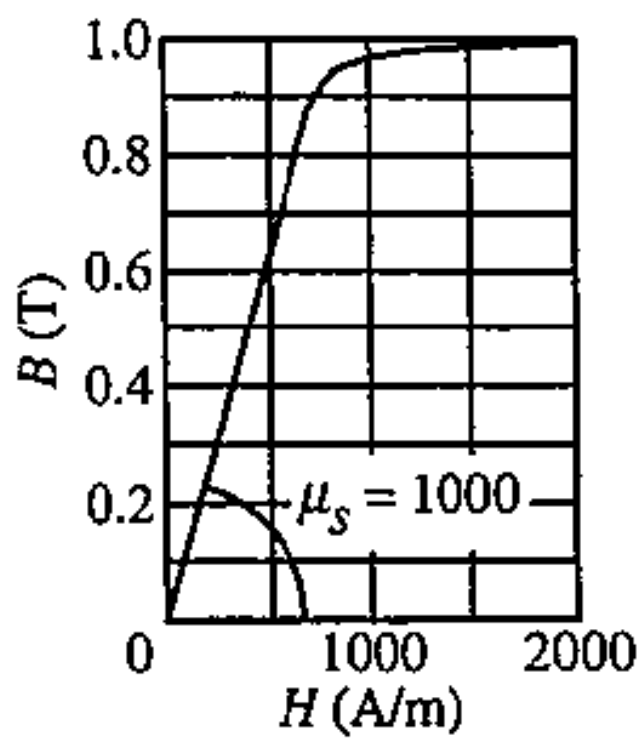


Fig. 2(a)



(b) important parameters

Fig. 2(b)



(c) B - H curve ($M_s = 1$ T)

Fig. 2(c)

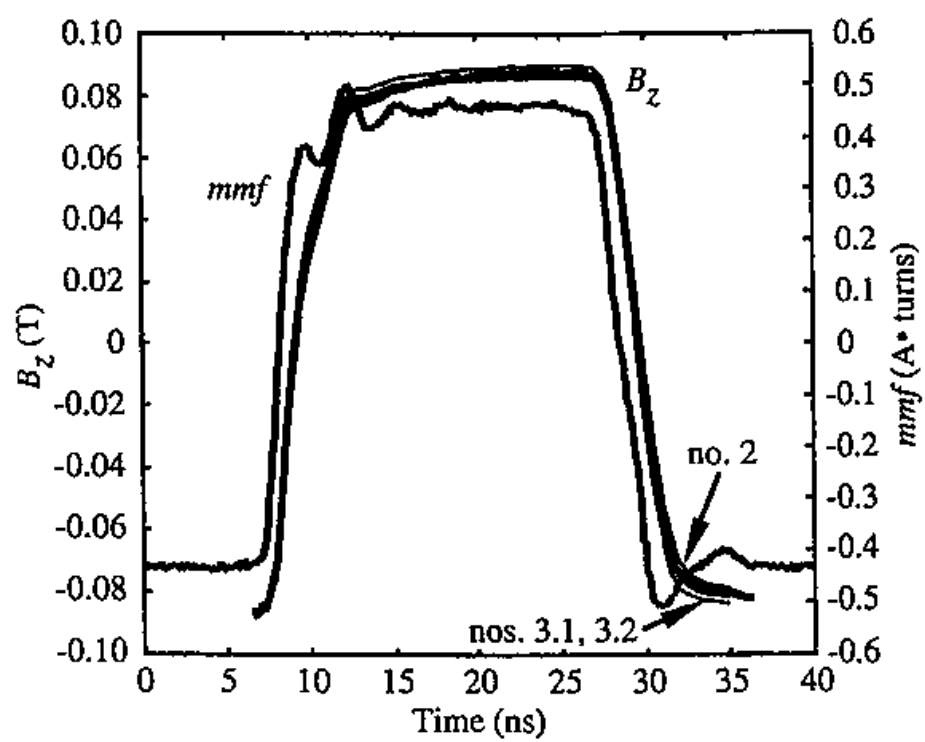


Fig. 3

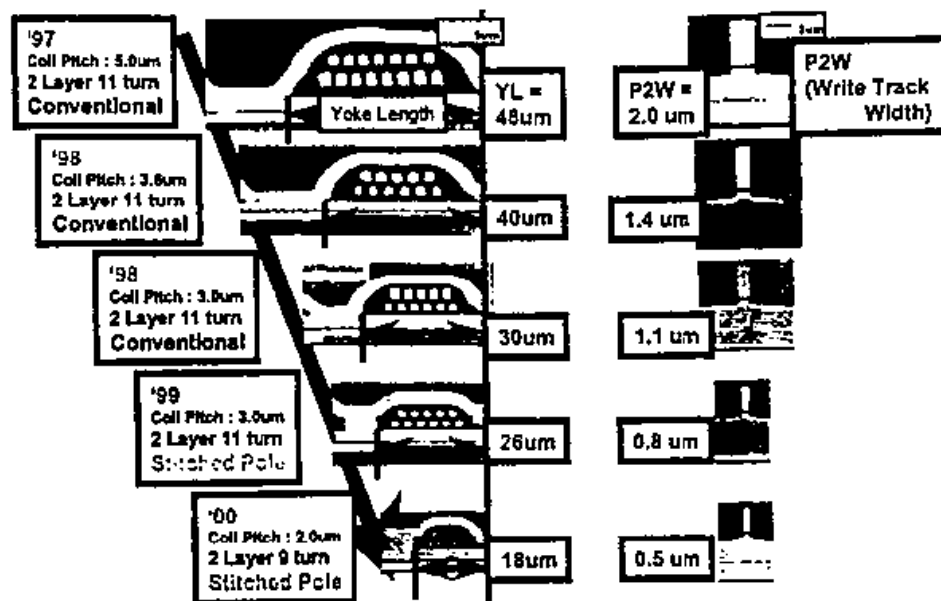


Fig. 4

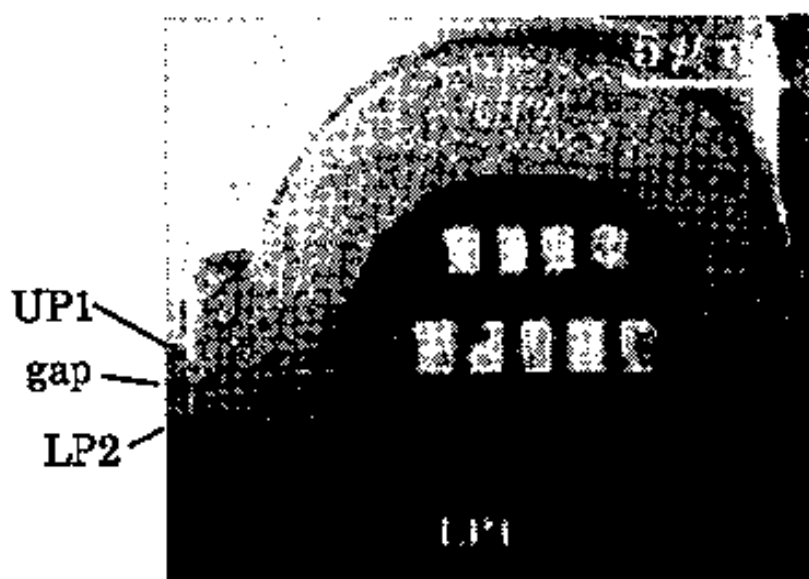


Fig. 5

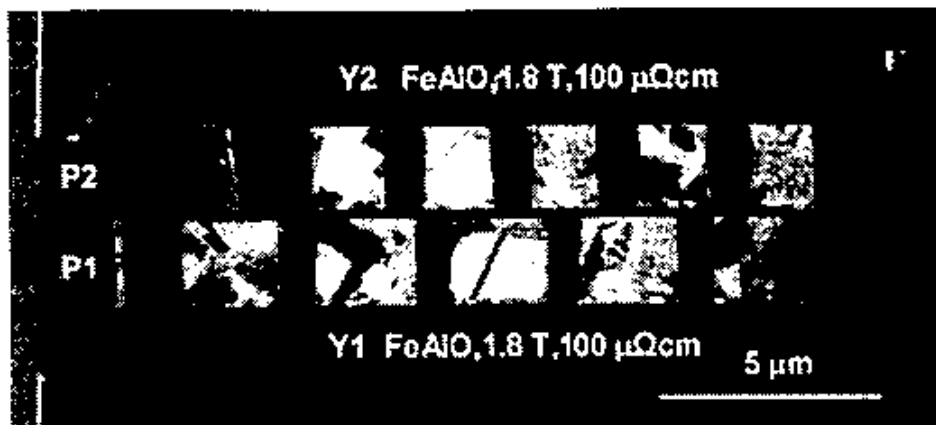


Fig. 6

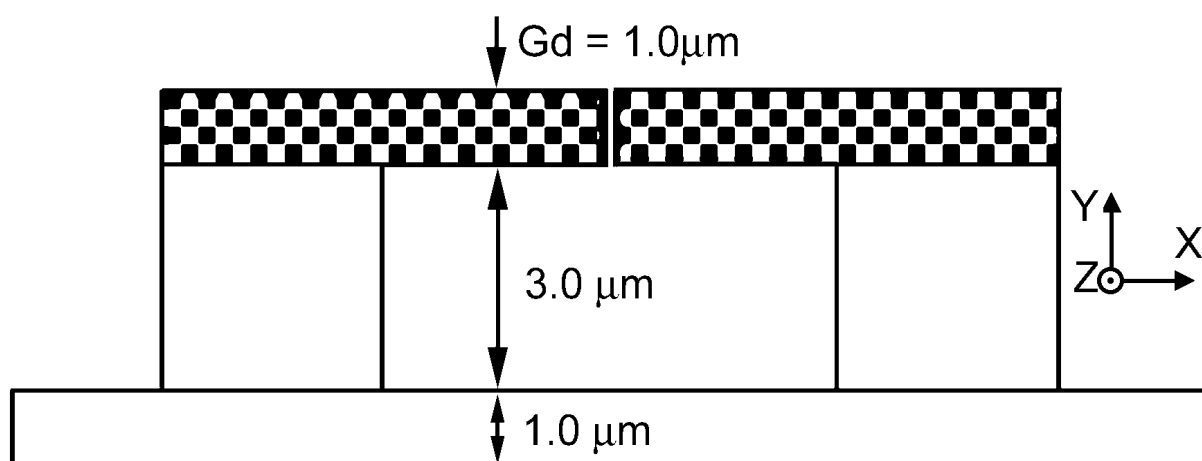


Fig. 7(b)

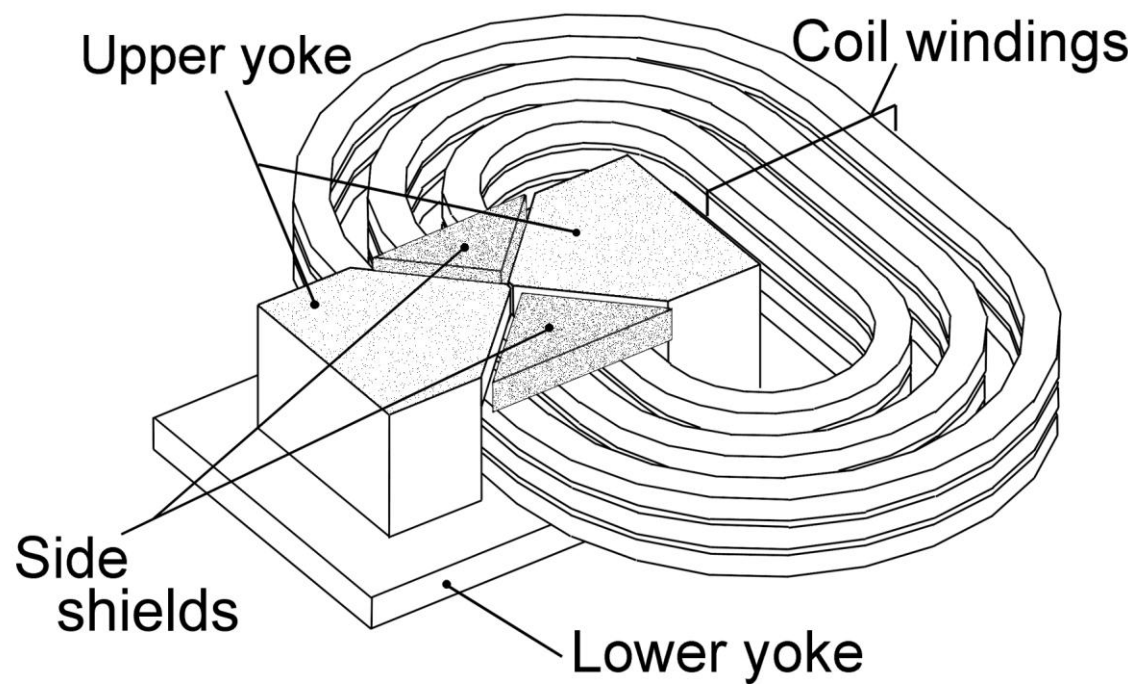


Fig. 8(a)

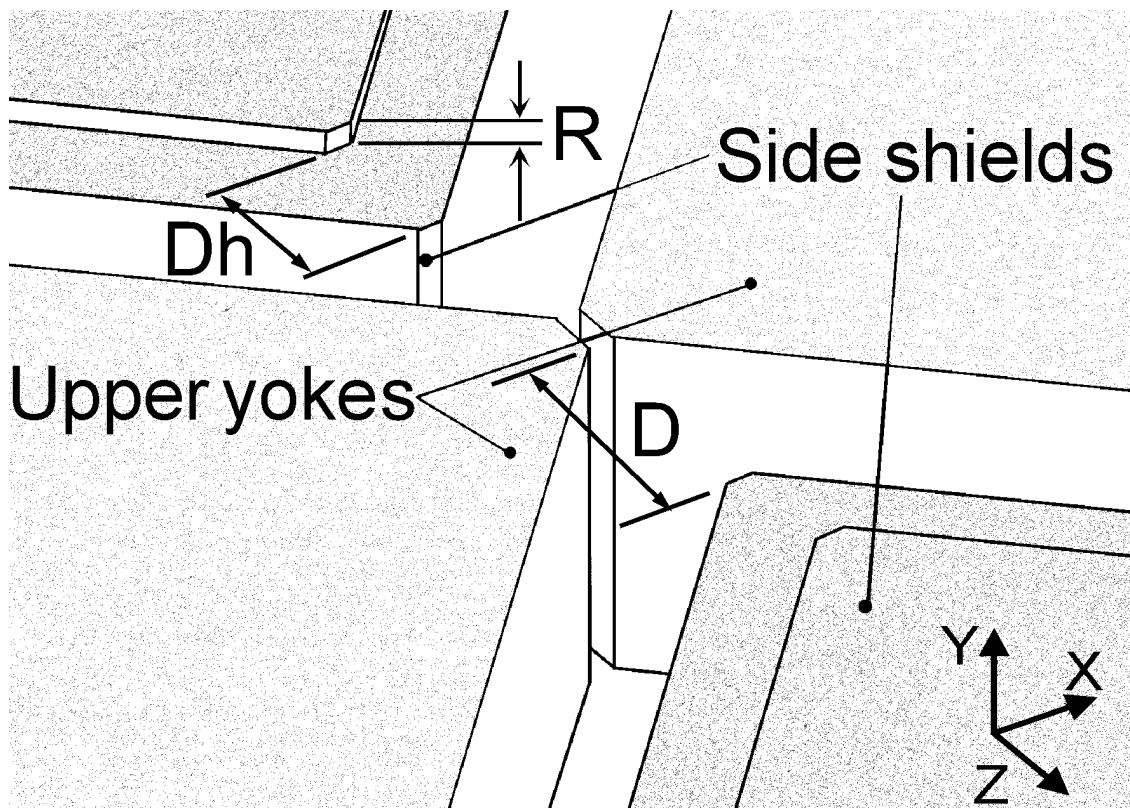


Fig. 8(b)

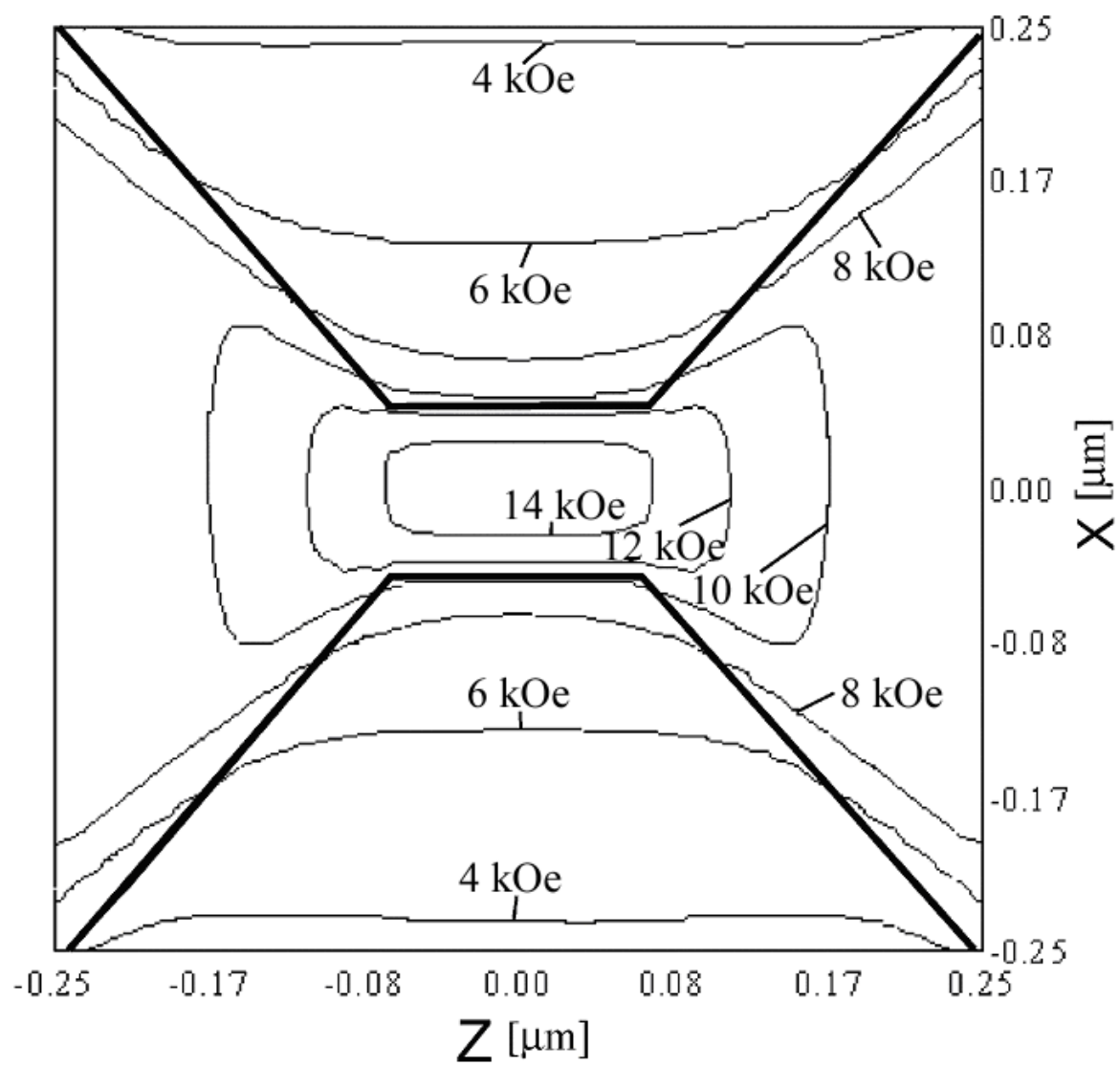


Fig. 9(a)

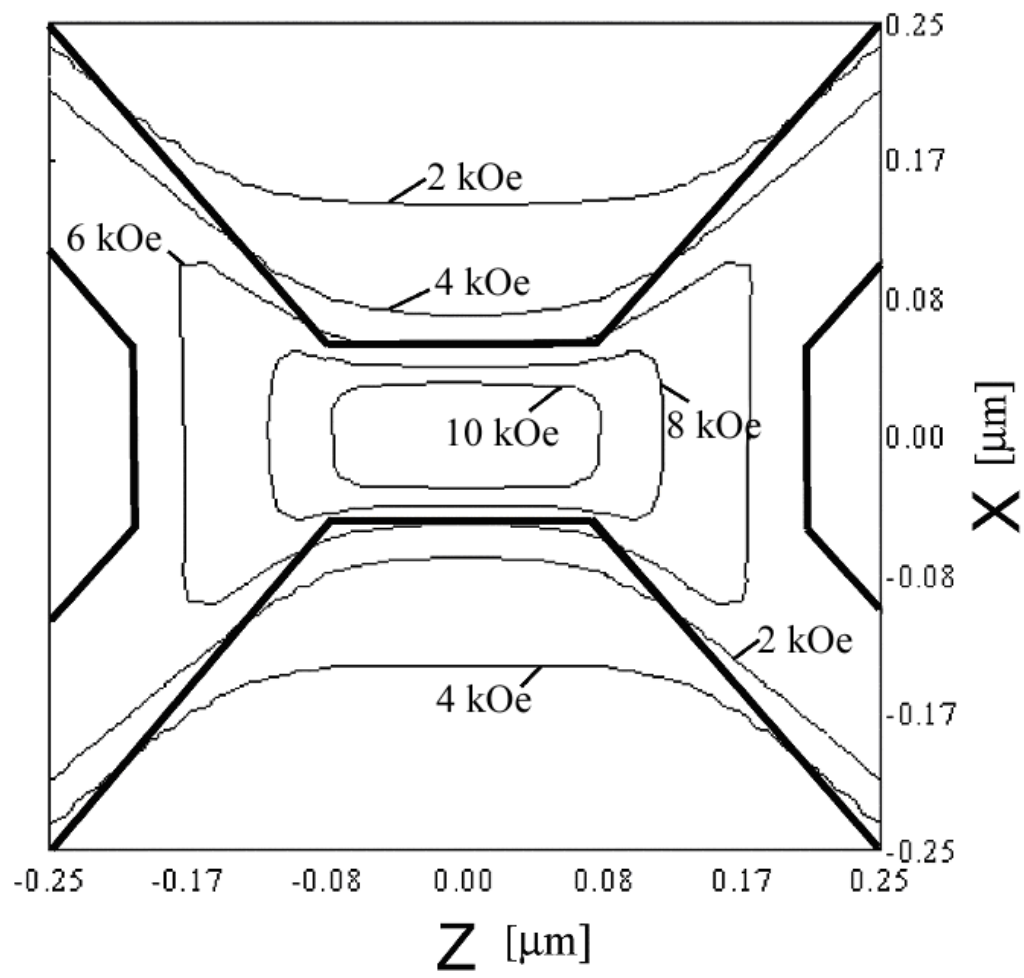


Fig. 9(b)

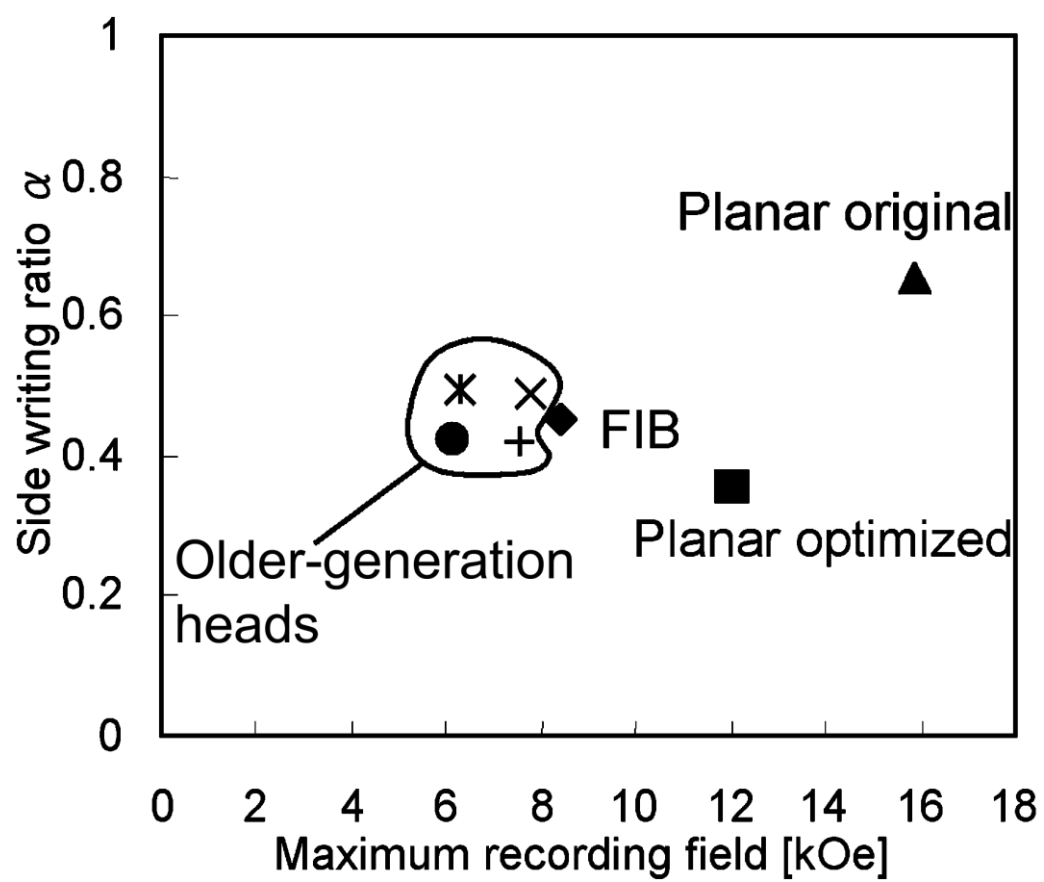


Fig. 9(c)

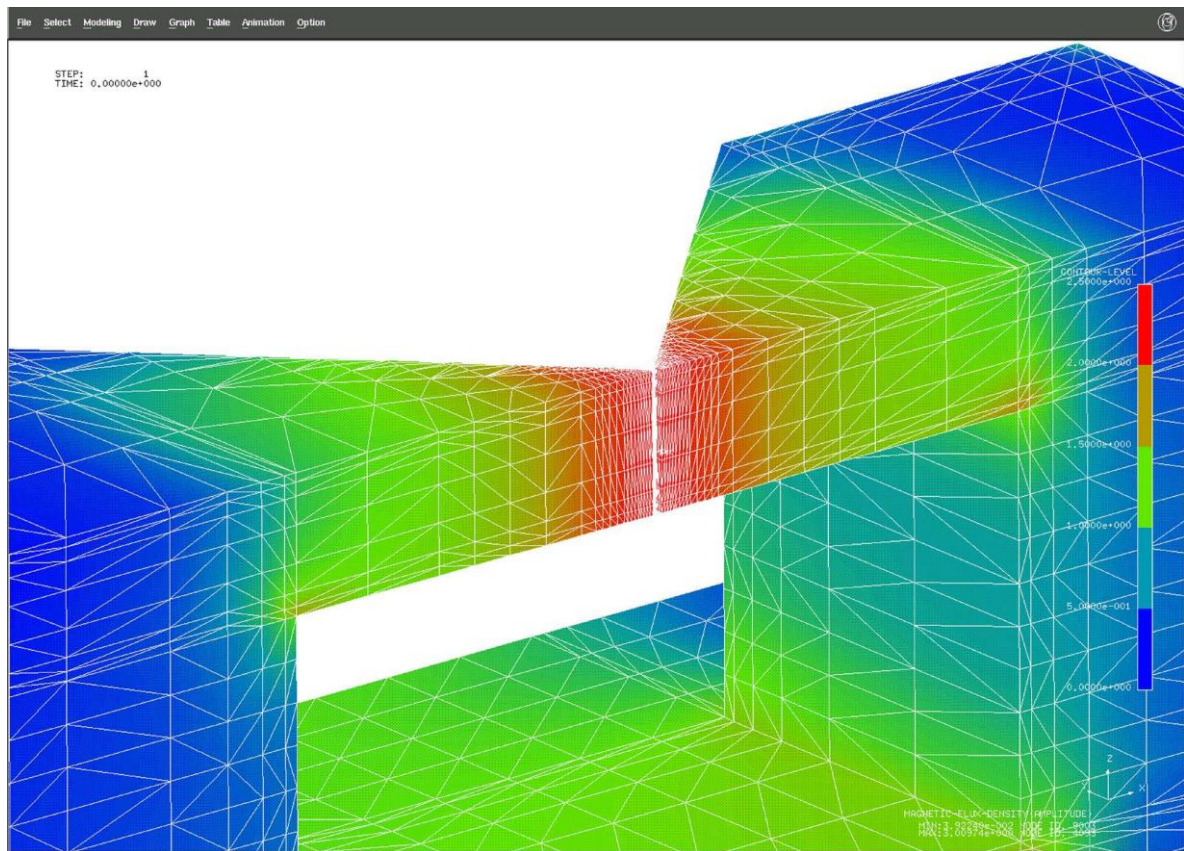


Fig. 10

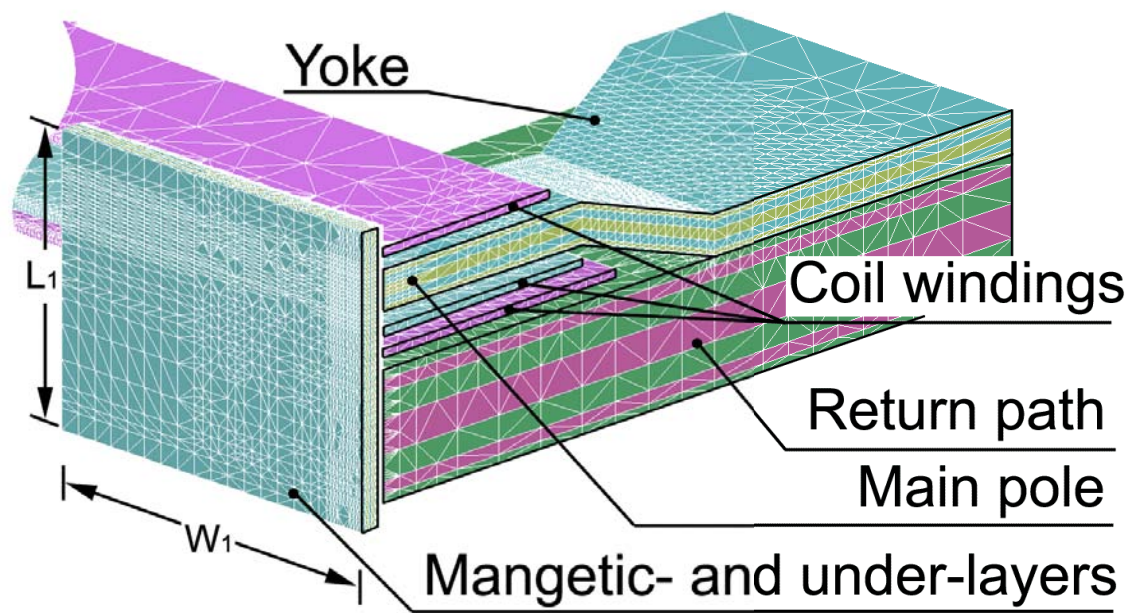


Fig. 11

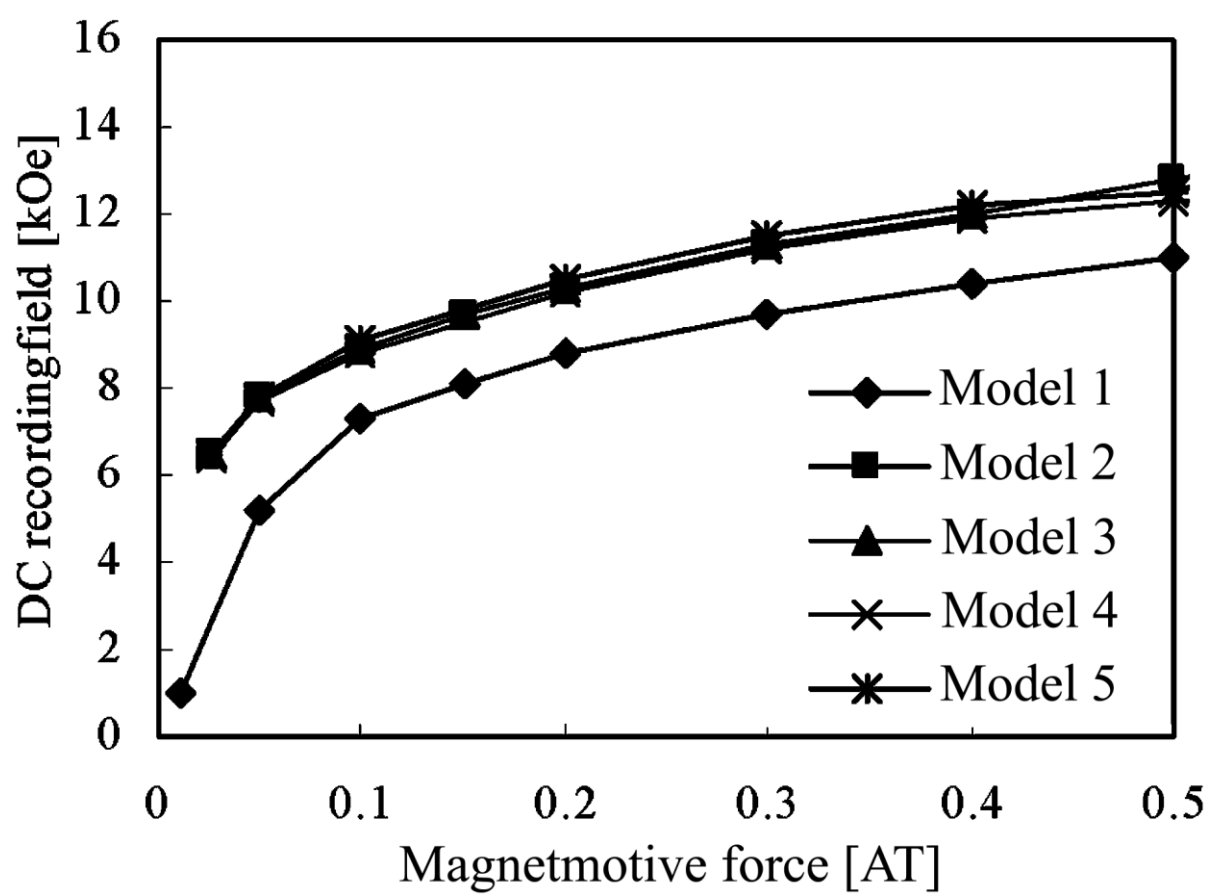


Fig. 12(a)

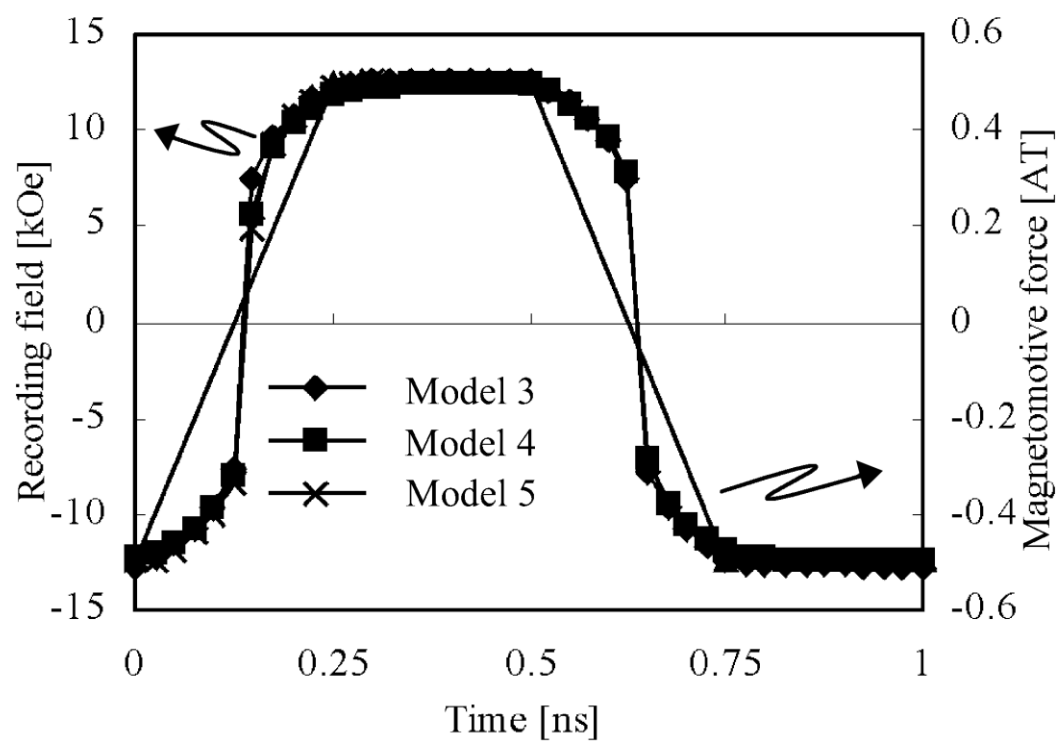


Fig. 12(b)

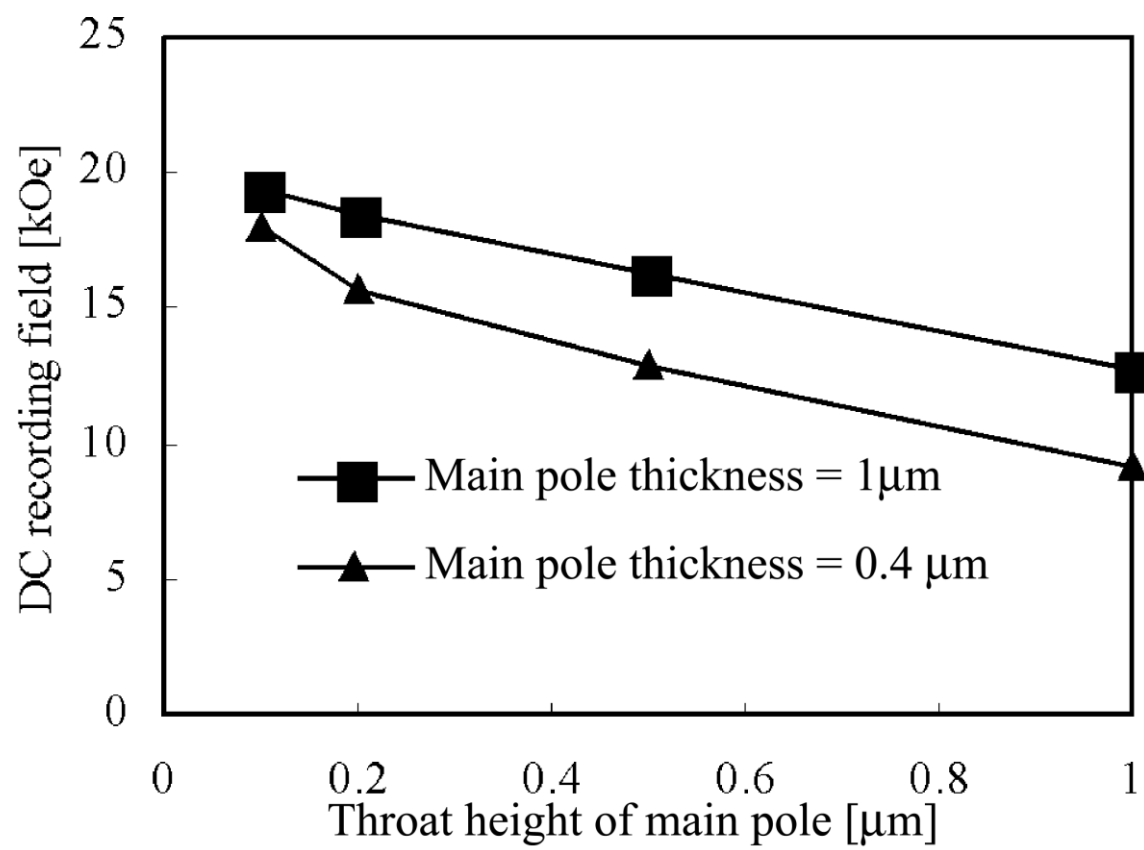


Fig. 13

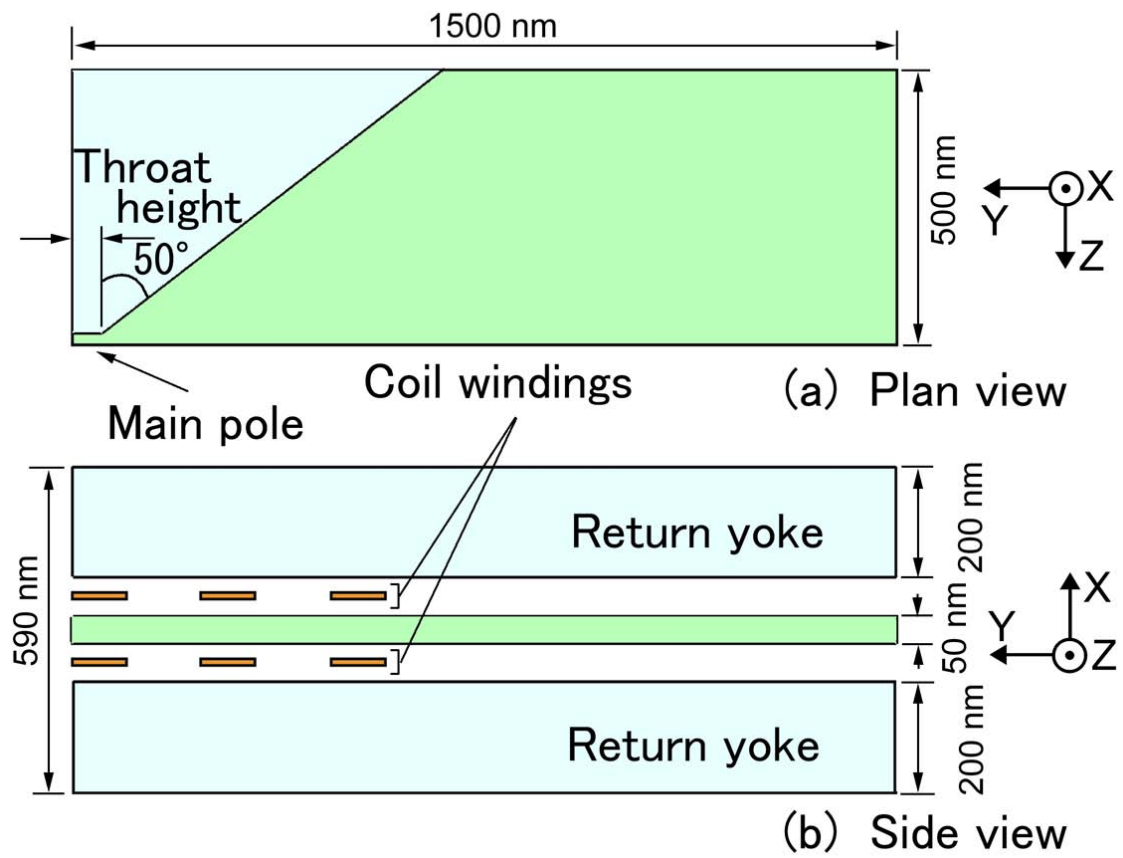


Fig. 14

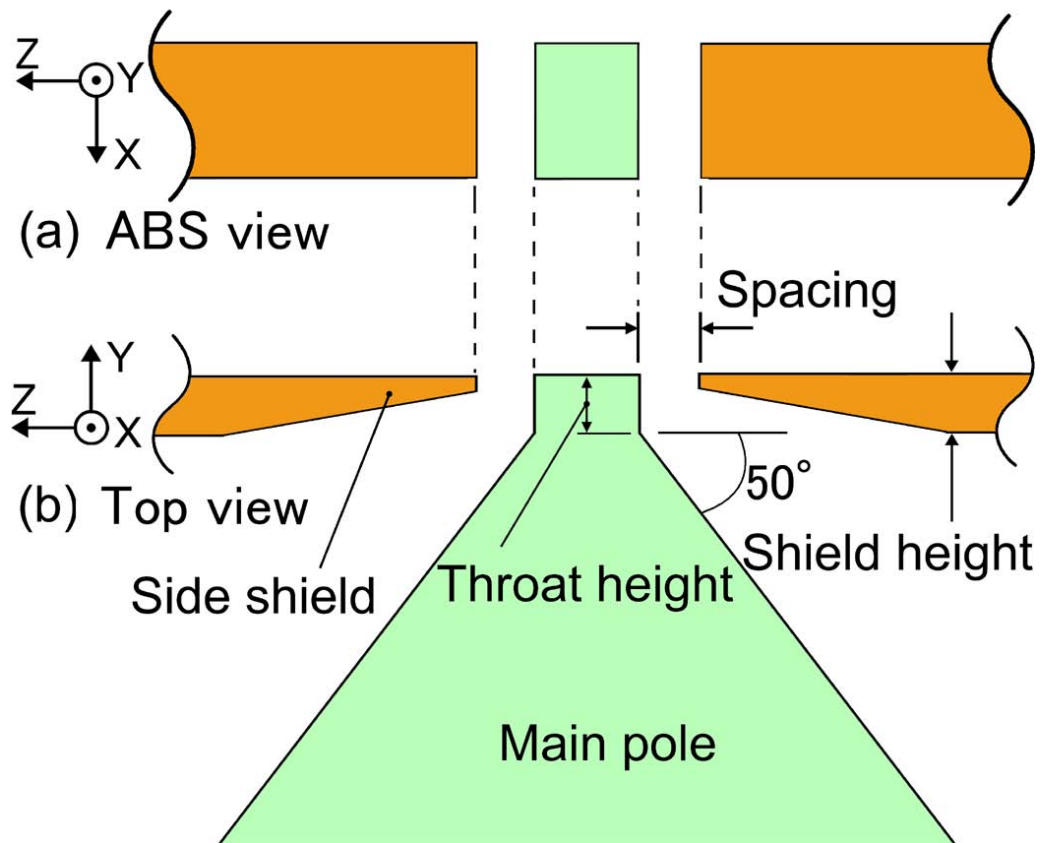


Fig. 15

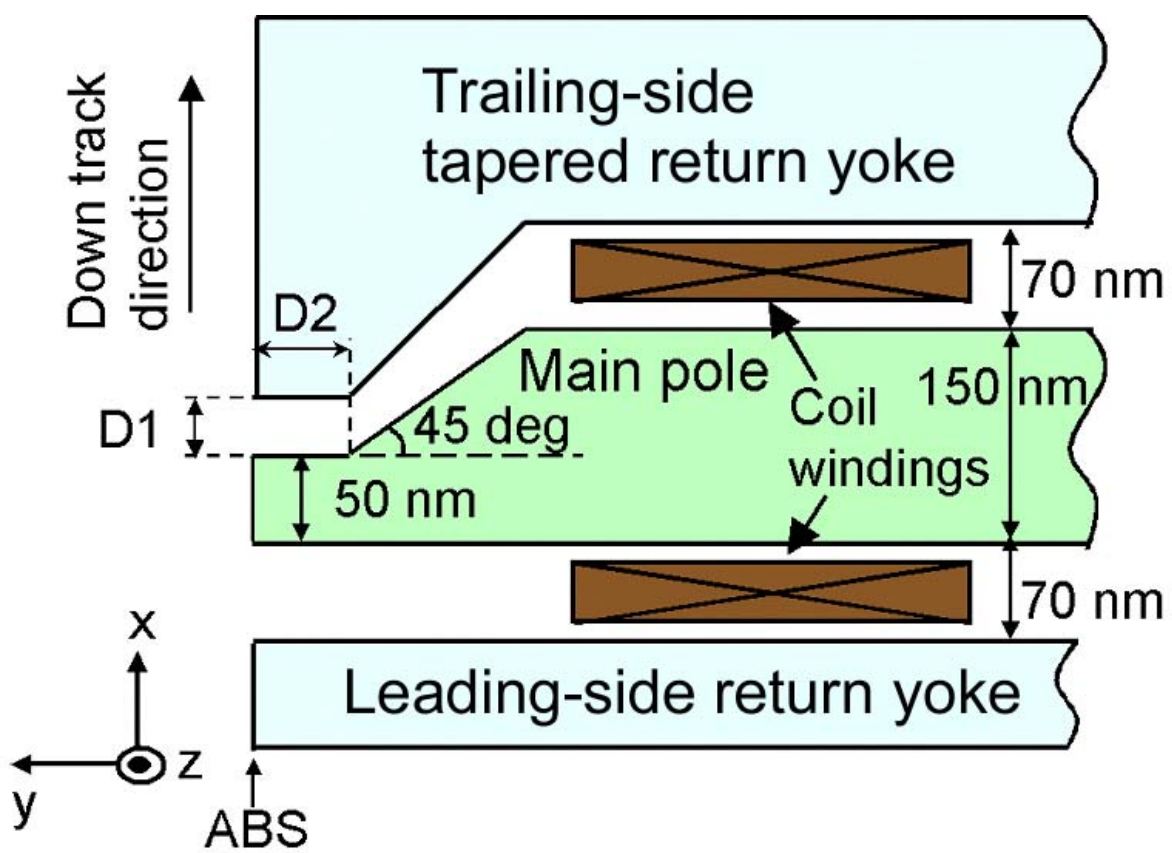


Fig. 16

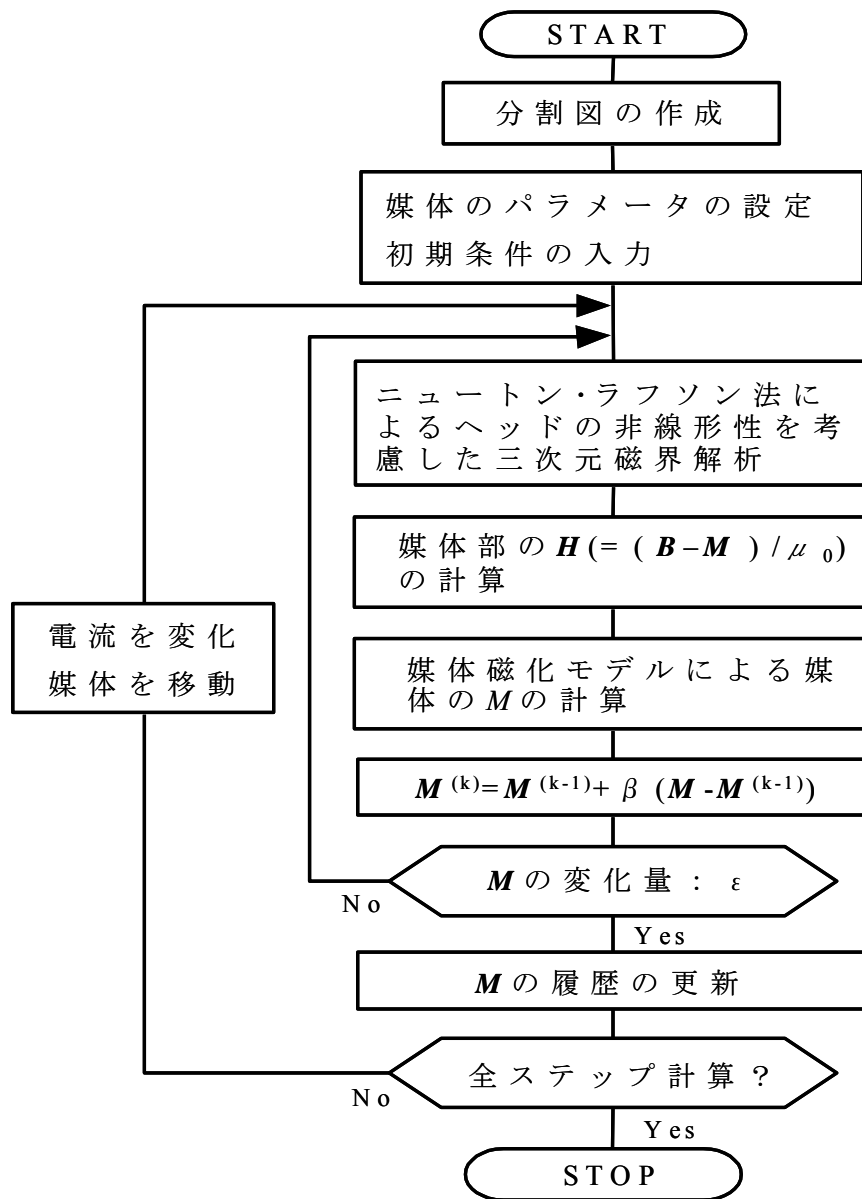
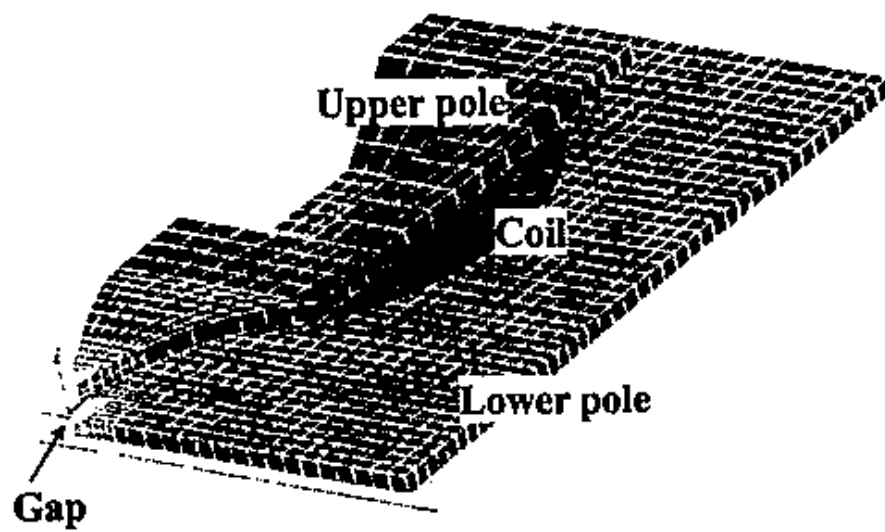
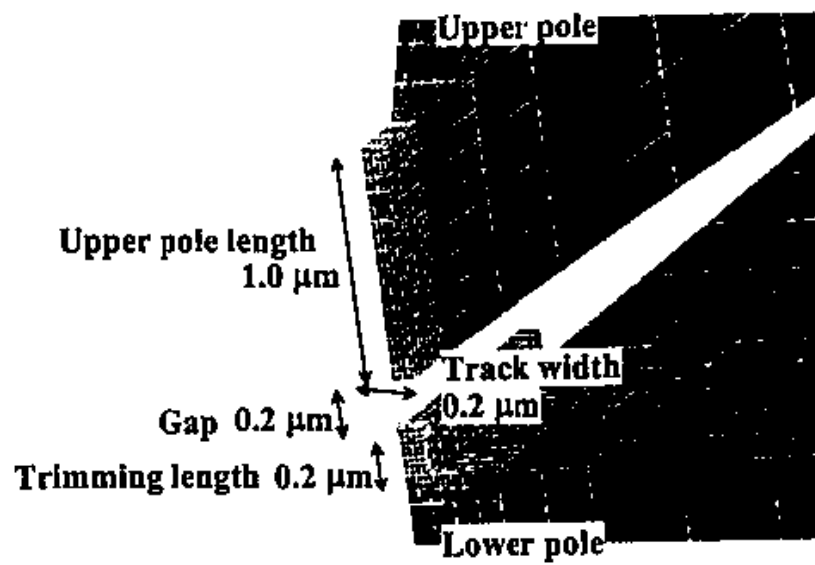


Fig. 17



(a) General view of the recording head

Fig. 18(a)



(b) Head structure near the gap

Fig. 18(b)

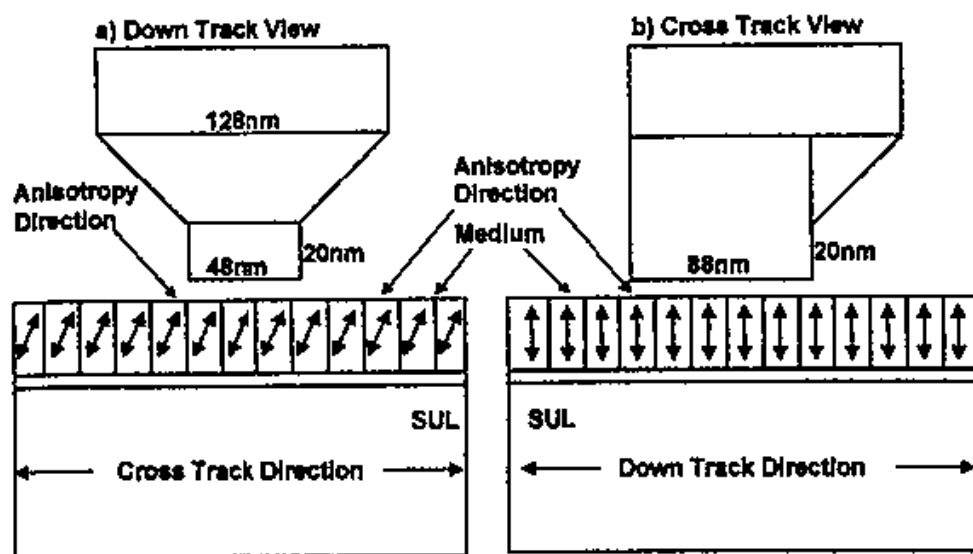


Fig. 19

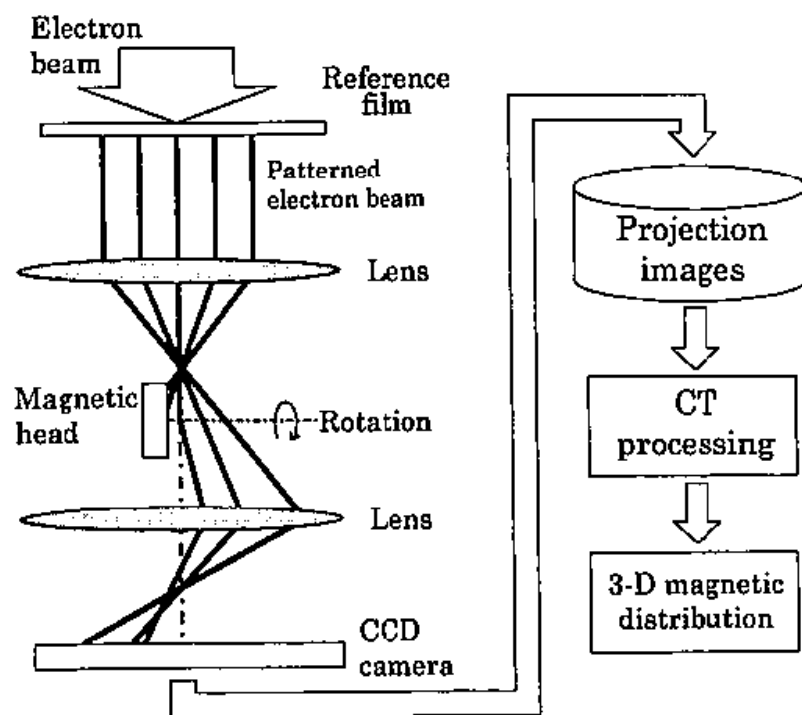


Fig. 20

Table 1 Various models used for calculations.

Model id #	Area of under-layer	Area of recording-layer	No. of elements
1	1.5 μm x 2 μm	1.5 μm x 2 μm	246,297
2	6.8 μm x 9 μm	*note	294,790
3	6.8 μm x 9 μm	6.8 μm x 9 μm	326,500
4	20 μm x 20 μm	20 μm x 20 μm	395,661
5	25 μm x 25 μm	25 μm x 25 μm	465,414

*note: recording track (0.05 μm x 6.8 μm) and main pole tip neighbor (1 μm x 1.2 μm) were modeled.

Table 2 Major specifications of the cusp field SPT head for 1 Tbit/in².

The assumed saturation flux density and initial permeability for soft magnetic materials are 24 kG and 1000, respectively.

Main pole	Thickness	50 nm/150 nm/tapered
	Track width	<u>37(38) nm</u>
	Throat height	20 nm
	Magnetic spacing	<u>6.5 nm</u>
Medium	Thickness	<u>9 nm</u>
	Coercivity	<u>12 kOe</u>
	Initial permeability	2
Underlayer	Thickness	25 nm
Return paths	Thickness	200 nm

Table 3 Calculated dc recording field strength, recording field gradient,
and side-writing ratio for various structures.

Model id number	1	2	3	4	5	6	7	8
Side shields	Without	With	Without	With	Without	With	Without	With
Trailing side return yoke	Conventional	Conventional	Conventional	Conventional	Conventional	Conventional	Tapered	Tapered
MP thickness: ABS view	50	50	150	150	50 tapered	50 tapered	50 tapered	50 tapered
Recording field MAX (kOe)	12.3	11.7	20.8	15.7	20.6	19.5	19.2	18.0
Recording field gradient MAX dHy/dx (Oe/nm)	393	390	518	413	397	383	504	481
Recording field at maximum field gradient is obtained (kOe)	7.6	8.6	9.6	10.6	11.6	12.6	13.6	14.6
Side-writing ratio	0.30	0.12	0.39	0.18	0.40	0.25	0.36	0.16

Table 4 Electromagnetic field simulators available on the market.

販売先	製品名	手法	Web site (http://)
日本総合研究所	JMAG-Works/Studio	有限要素法	www.jri.co.jp/pro-eng/jmag/jmg/index.html
アンシスジャパン	ANSYS/Emag	有限要素法	www.ansys.co.jp/html/emag.htm
極東貿易	OPERA-3d	有限要素法	www.kbk.co.jp/sdi/index2.htm
エー・イー・ティー・ジャパ	MAFIA	有限積分法	www.aetjapan.co.jp/software/2-2.html
フoton	PHOTO-Eddy	有限要素法	www.photon-cae.co.jp/
サイエンスソリューションズ	EMSolution	有限要素法	www.ssil.com/em/EMSolution/ja/#EMSolution
エルフ	ELF/MAGIC	積分要素法	www.elf.co.jp/jp/jp_page.html
アンソフトジャパン	Maxwell 3D Transient	有限要素法	www.ansoft.co.jp
アドバンストテクノロジー	MagNet6 TR3D	有限要素法	www.ad-tech.co.jp/e33_2.html
エス・イー・エイ	Faraday	有限要素法	www.seainc.co.jp/denji.htm
CRCソリューションズ	MAGNA-FIM	有限積分方程式法	www.engineering-eye.com/products/MAGNA-FIM/